

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF ENERGY

NÁHRADA ZÁKLADNÍCH VÝMĚNÍKŮ V TEPLÁRNĚ MALEŠICE

REPLACEMENT BASIC HEAT EXCHANGERS IN MALEŠICE HEATING PLANT

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. TOMÁŠ RYBKA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. MAREK BALÁŠ

BRNO 2009

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2008/2009

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Tomáš Rybka

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Energetické inženýrství (2301T035)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Náhrada základních výměníků v Teplárně Malešice

v anglickém jazyce:

Replacement basic heat exchangers in Malesice heating plant

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Původní základní výměníky ZV3 a ZV4 byly součástí turbíny dodané v letech 1968 a 1969. Výměníky jsou trubkové, horizontální, se snímatelnými vodními komorami. Trubkový svazek je dělený, dvoucestný. Přední pevná trubkovnice tvoří jednu stěnu výměníku, zadní dělené trubkovnice jsou řešeny jako plovoucí a tato část je opatřena snímatelnými víky.

Základní výměník navrhnete jako horizontální, dělený, dvoucestný na straně topné vody a celosvařovaného provedení. Součástí ZV musí být integrovaný chladič parovzdušné směsi. Výměník bude umístěn pod turbínou a v přechodovém parním potrubí bude umístěn kompenzátor.

Cíle diplomové práce:

Základní výměník navrhnete pro výše uvedené zadání. Tepelné výpočty provedte alespoň pro následující materiály teplosměnných trubek:

- CuZn20Al2As, 17 248.4, 17 348.4, Ti Gr2, VLX 439

Pro vybrané materiály provedte charakteristiky (závislost tepelného výkonu na hmotnostním průtoku topné vody) pro různé průtoky od 1500 t/hod do 8000 t/hod.

Dále zhodnoťte ekonomickou efektivnost jednotlivých použitých materiálů teplosměnných trubek v horizontu provozování 25 let. K tomu vám konzultant poskytne cenové údaje a předpoklady intervalů nutných výměn teplosměnných trubek.

Seznam odborné literatury:

Budaj, F.: Parní kotle – podklady pro tepelný výpočet, VUT v Brně, 1992

Černý, V.-Janeba, B.-Teyssler, J.: Parní kotle. Technický průvodce 32, SNTL, 1983

Vedoucí diplomové práce: Ing. Marek Baláš

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2008/2009.

V Brně, dne 20.11.2008

L.S.

doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.
Ředitel ústavu

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že předložená diplomová práce je původní a zpracoval jsem ji samostatně. Prohlašuji, že citace použitých pramenů je úplná, že jsem v práci neporušil autorská práva (ve smyslu zákona č.121/2000 Sb. o právech souvisejících s právem autorským).

V Brně, dne 28.května 2009

.....

Rybka Tomáš

ABSTRAKT

Hlavním úkolem této diplomové práce je návrh dvoucestného výměníku tepla s integrovaným chladičem parovzdušné směsi a porovnání materiálů teplosměnné plochy. Dalším úkolem je pevnostní dimenzování tohoto výměníku a ekonomická efektivnost použitých materiálů teplosměnných ploch.

ABSTRACT

The main goal of this master's thesis is a proposal of double way heat exchanger with integrated air-vapor mixture cooler and compare of heat transfer surface's materials. Second goals are solidity dimensioning of this heat exchanger and economic effectiveness of used heat transfer surface's materials.

KLÍČOVÁ SLOVA

výměník tepla
voda
sytá pára
kondenzát
trubka
materiál
tlak
teplota

KEY WORDS

heat exchanger
water
saturated vapor
condensate water
tube
material
pressure
temperature

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych na tomto místě poděkovat hlavně Ing. Kristině Takáčové a Ing. Naděždě Šoborové oběma z ALSTOM Power, s.r.o v Brně za jejich ochotu, cenné připomínky a rady při zpracování této diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat svému vedoucímu diplomové práce Ing. Marku Balášovi z VUT FSI EÚ v Brně a Ing. Rostislavu Ratkovskému z ALSTOM Power, s.r.o v Brně rovněž za jejich cenné připomínky.

OBSAH

ÚVOD	13
1 TEPELNÝ VÝPOČET VÝMĚNÍKU TEPLA	15
1.1 Předběžný výpočet	16
1.1.1 Součinitel prostupu tepla k	19
1.1.2 Střední logaritmický teplotní spád Δt_L	26
1.1.3 Přenášený tepelný výkon Q	27
1.1.4 Teplosměnná plocha S	27
1.1.5 Délka trubkového svazku L	27
1.2 Výpočet výměníku se zahrnutím chladiče	28
1.2.1 Výpočet části CH	30
1.2.2 Výpočet části K1	32
1.2.3 Výpočet K1+CH	35
1.2.4 Výpočet části K2	37
1.2.5 Celková délka výměníku L	38
1.2.6 Celková velikost teplosměnné plochy S	40
1.3 Závislost tepelného výkonu na hmotnostním průtoku topné vody	41
2 HYDRAULICKÝ VÝPOČET VÝMĚNÍKU	45
2.1 Rozměry hrdel	45
2.1.1 Rozměry hrdel na straně oběhové topné vody	45
2.1.2 Rozměry hrdel na straně syté páry / kondenzátu	46
2.2 Tlakové ztráty na straně oběhové topné vody	48
2.2.1 Čistý výměník	49
2.2.2 Zanesený výměník	52
3 KONSTRUKČNÍ NÁVRH VÝMĚNÍKU	57
4 PEVNOSTNÍ VÝPOČET VÝMĚNÍKU	61
4.1 Trubkovnice	63
4.1.1 Vlastnosti materiálů, volba základních rozměrů komponent	63
4.1.2 Výpočet	69
4.2 Plášť vodní komory	104

4.2.1	Vlastnosti materiálu, volba základních rozměrů komponenty	104
4.2.2	Výpočet	105
4.2.3	Vyztužení otvoru vsazeným hrdlem a výztužným límcem	111
4.3	Plášť parní	118
4.3.1	Vlastnosti materiálu, volba základních rozměrů komponenty	118
4.3.2	Výpočet	120
4.4	Klenuté dno na straně vody	129
4.4.1	Vlastnosti materiálu, volba základních rozměrů komponenty	129
4.4.2	Výpočet	131
4.4.3	Nevyztužené otvory	139
4.4.4	Vyztužení otvoru vsazeným hrdlem a výztužným límcem	142
4.5	Vstupní / výstupní hrdla na straně vody	149
4.5.1	Vlastnosti materiálu, volba základních rozměrů komponenty	149
4.5.2	Výpočet	150
4.6	Trubky	151
4.6.1	Vlastnosti materiálu, volba základních rozměrů komponenty	151
4.6.2	Výpočet	153
4.7	Kompenzátor	158
5	EKONOMICKÁ EFEKTIVNOST POUŽITÝCH MATERIÁLŮ	161
5.1	Výpočet pro plochu 2800m ²	162
5.2	Výpočet pro výsledné plochy z tepelného výpočtu	163
6	ZÁVĚR	165
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	167
	SEZNAM PŘÍLOH	167
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ	169
	Tepelný výpočet	169
	Hydraulický výpočet	170
	Pevnostní výpočet	171
	Ekonomická efektivnost použitých materiálů	173

ÚVOD

Nedílnou součástí všech parních teplárenských cyklů jsou výměníky tepla, které hrají klíčovou úlohu v předávání tepelné energie mezi teponosnými médii. Mezi ty nejhlavnější patří ohříváky oběhové topné vody a to jak pro teplovodní tak i horkovodní distribuční síť. Kondenzací páry proudící z turbíny na teplosměnné ploše dochází k ohřevu oběhové topné vody, která tuto tepelnou energii akumuluje a nakonec předává konečnému zákazníkovi. Na konečné rozměry výměníku tepla má zásadní vliv velikost potřebné teplosměnné plochy a počet chodů. U těchto výměníků bývá nejčastěji teplosměnná plocha tvořena hustými trubkovými svazky přímých trubek nebo vlásenek. Zásadní vliv na velikost teplosměnné plochy má volba materiálu trubek, která se pak odrazí i v celkové ceně výměníku.

V této diplomové práci jsou porovnány varianty výměníků v závislosti na použitých materiálech teplosměnné plochy a jejich vliv na velikosti teplosměnné plochy, velikosti tlakových ztrát, volbě konečných rozměrů výměníku z výsledků pevnostního dimenzování a také na ekonomickou efektivitu srovnávaných materiálů.

1 TEPELNÝ VÝPOČET VÝMĚNÍKU TEPLA

Zadání tepelného výpočtu:

Základní výměník navrhnete jako horizontální, dělený, dvoucestný na straně topné vody a celosvařovaného provedení. Součástí ZV musí být integrovaný chladič parovzdušné směsi. Výměník bude umístěn pod turbínou a v přechodovém parním potrubí bude umístěn kompenzátor.

Parametry ZV:

Hmotnostní průtok vody:

- jmenovitý	6000t/hod
- maximální	8000t/hod
Vstupní teplota oběhové topné vody	70°C
Výstupní teplota oběhové topné vody	94,3°C
Provozní tlak oběhové topné vody	20 bar (a)
Vstupní tlak syté páry	1,625 bar (a)
Teplota vystupujícího kondenzátu	na mezi sytosti

Tepelné výpočty proveďte alespoň pro následující materiály teplosměnných trubek:

CuZn20Al2As

17 248.4

17 348.4

TiGr2

VLX 439

12 021.1

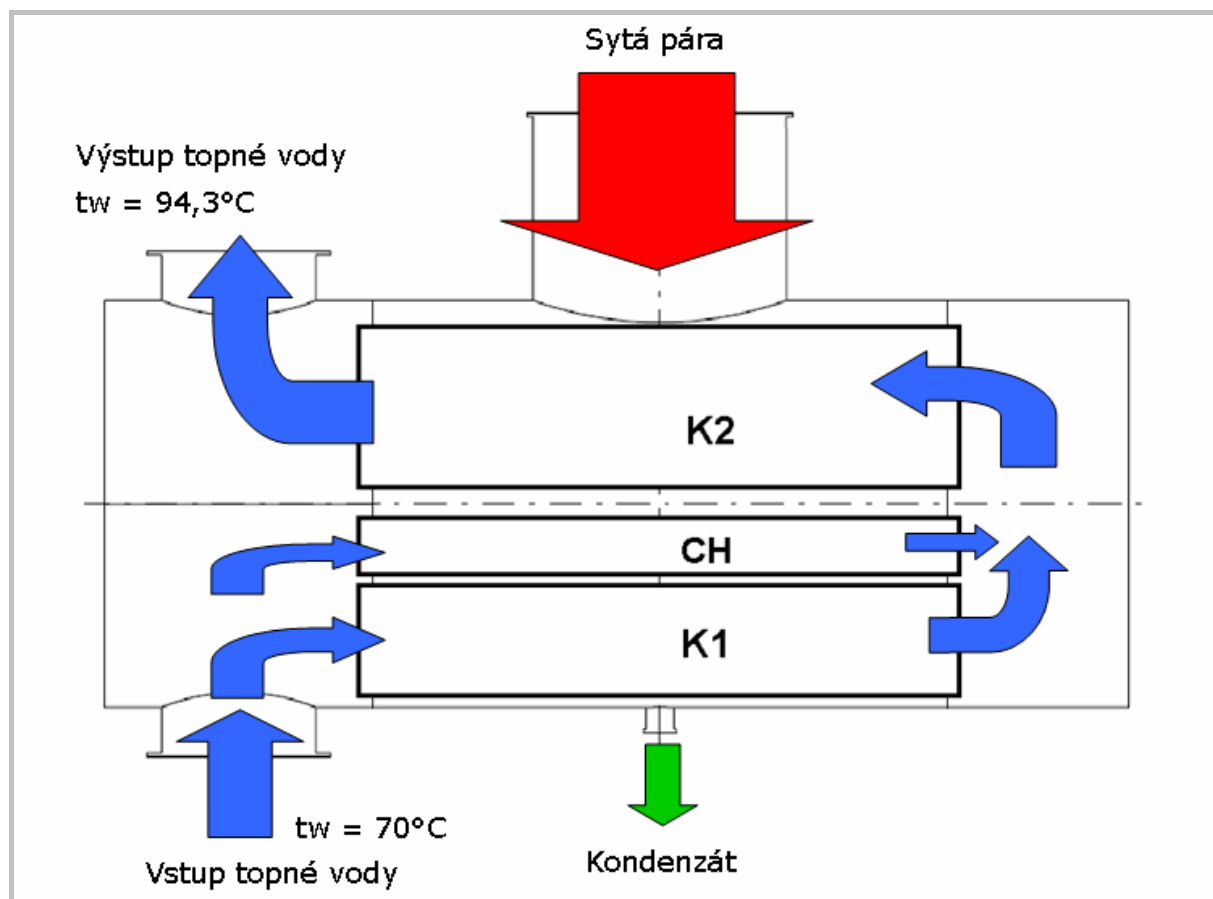
Pro vybrané materiály proveďte charakteristiky (závislost tepelného výkonu na hmotnostním průtoku topné vody) pro různé průtoky od 1500 t/hod do 8000 t/hod.

Tab.1.1 Volba průměrů trubek (d), tlouštěk stěn trubek (t), rychlosti proudění topné vody uvnitř trubek (w) a součinitel tepelné vodivosti materiálu (λ) pro jednotlivé materiály teplosměnných ploch.

	d x t [mm]	w [m/s]	λ [W/mK]
CuZn20Al2As	20 x 1,5	2	100
17 248.4	20 x 1	2,1	15
17 348.4	20 x 1	2,1	15
TiGr2	20 x 0,7	2	20
VLX 439	20 x 1	2	24
12 021.1	20 x 1,5	1,9	45

1.1 Předběžný výpočet

Veškeré výpočty budou prováděny následujícím postupem. Do všech vzorců v průběhu výpočtu budou dosazovány jen hodnoty pro jeden materiál teplosměnné plochy a pro zbývající materiály budou v tabulce hned pod vzorcem uvedeny pouze jejich výsledky pro daný vzorec, pokud budou mít odlišný výsledek. Celý výpočet byl prováděn v programu MS Excel.



Obr. 1.1 Schéma proudění obou médií ve dvoucestném výměníku tepla, kde K1 a K2 jsou části teplosměnné plochy, ve kterých dochází k ohřevu oběhové topné vody, CH je integrovaný chladič parovzdušní směsi, ve kterém nedochází k ohřevu topné vody, tedy teplota vody na vstupu a výstupu z CH je stejná. Topná voda se na výstupu z K1 a CH spolu smísí v obrátové komoře a proudí do K2.

Teplosměnná plocha výměníku tepla bude navržena na maximální průtok oběhové vody 8000t/hod. V předběžném výpočtu bude dále použita střední teplota oběhové topné vody. Není uvažován vliv integrovaného chladiče parovzdušní směsi.

Parametry, převody jednotek:

Hmotnostní průtok vody:

$$\dot{M}_{w \max} = 8000 \left[\frac{t}{\text{hod}} \right] = 2222,222 \left[\frac{\text{kg}}{s} \right]$$

Provozní tlak oběhové topné vody:

$$P_w = 20 [\text{bar}] = 2 [\text{MPa}]$$

Vstupní tlak syté páry:

$$P_s = 1,625 [\text{bar}] = 0,1625 [\text{MPa}]$$

Teplota vystupujícího kondenzátu na mezi sytosti: z tabulek [2] pro tlak P_s

$$P_s = 0,1625 [MPa] \Rightarrow t_s = 113,769 [^{\circ}C]$$

Hustota oběhové vody na vstupu: z tabulek [2] pro $t_{win} = 70 [^{\circ}C]$ $P_w = 2 [MPa]$

$$\Rightarrow \rho_{win} = 978,613 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

Hustota oběhové vody na výstupu: z tabulek [2] pro $t_{wout} = 94,3 [^{\circ}C]$ $P_w = 2 [MPa]$

$$\Rightarrow \rho_{wout} = 963,255 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

Hustota oběhové vody pro střední teplotu:

$$\rho_{wstr} = \frac{\rho_{win} + \rho_{wout}}{2} = \frac{978,613 \left[\frac{kg}{m^3} \right] + 963,255 \left[\frac{kg}{m^3} \right]}{2} = 970,934 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

Průtočný průřez vody v jedné cestě A_w :

pro 17 248.4

$$A_w = \frac{\dot{M}_{wmax}}{w \cdot \rho_{wstr}} = \frac{2222,222 \left[\frac{kg}{s} \right]}{2,1 \left[\frac{m}{s} \right] \cdot 970,934 \left[\frac{kg}{m^3} \right]} = 1,090 [m^2]$$

Tab.1.2 Průtočný průřez oběhové vody $A_w [m^2]$

17 248.4	1,090	TiGr2	1,144
17 348.4	1,090	12 021.1	1,205
VLX 439	1,144	CuZn20Al2As	1,144

Vnitřní průměr trubky d_{int} :

pro 17 248.4

$$d_{int} = d - 2 \cdot t = 20 [mm] - 2 \cdot 1 [mm] = 18 [mm]$$

Tab.1.3 Vnitřní průměr trubky $d_{int} [mm]$

17 248.4	18	TiGr2	18,6
17 348.4	18	12 021.1	17
VLX 439	18	CuZn20Al2As	17

Počet trubek v jedné cestě n_{tr} :

pro 17 248.4

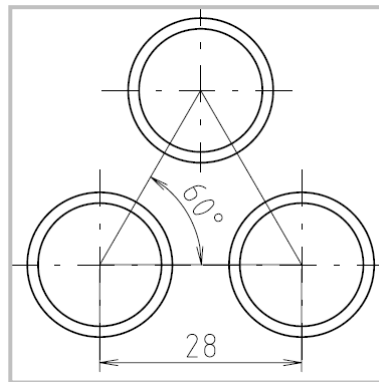
$$n_{tr} = \frac{4 \cdot A_w}{\pi \cdot d_{int}^2} = \frac{4 \cdot 1,090 [m^2]}{\pi \cdot \left(\frac{18}{1000} [m] \right)^2} = 4282,95 \Rightarrow 4283$$

Tab.1.4 Počet trubek v jedné cestě n_{tr} :

17 248.4	4283	TiGr2	4212
17 348.4	4283	12 021.1	5308
VLX 439	4498	CuZn20Al2As	5042

Uspořádání trubek:

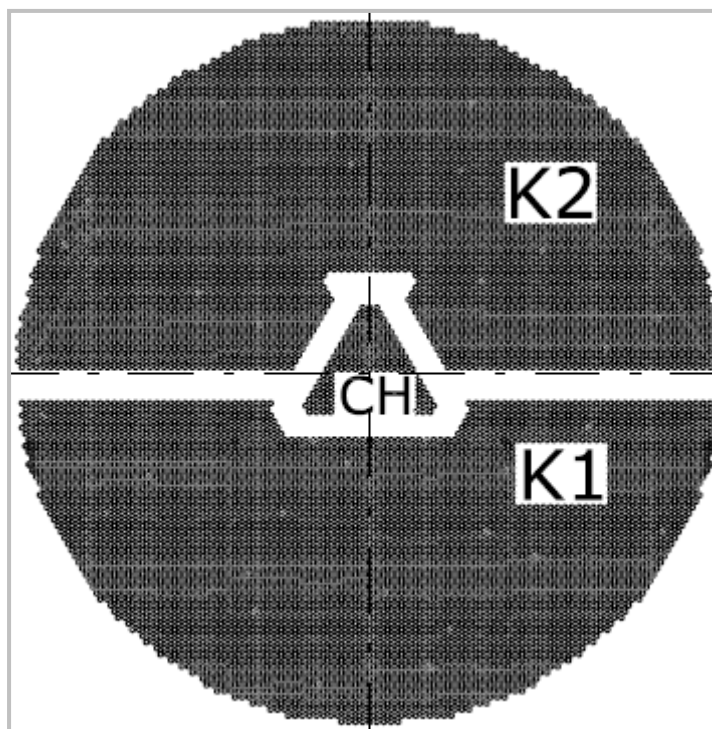
Pro všechny materiály teplosměnných ploch zvoleno trojúhelníkové uspořádání trubek, rozteč trubek 28mm, vrcholový úhel 60° .



Obr. 1.2 Schéma uspořádání trubek

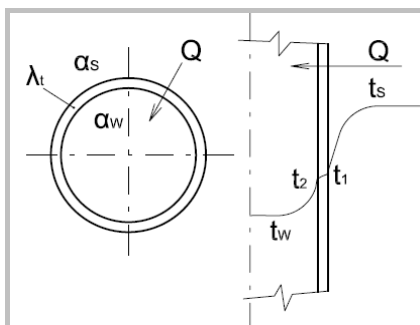
Návrh uspořádání trubkového svazku:

Grafickou metodou v programu AutoCAD byla navržena síť trubkového svazku. Byly brány ohledy na zadání, kde bylo požadováno, aby byl výměník navrhnut jako dělený, dvoucestný s integrovaným chladičem parovzdušní směsi a také na trojúhelníkové uspořádání trubek.



Obr. 1.3 Schéma sítě trubkového svazku. CH + K1 představují jednu cestu, K2 pak druhou cestu.

1.1.1 Součinitel prostupu tepla k



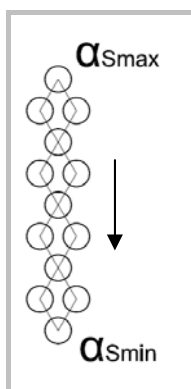
Obr. 1.4 Schéma průběhu teploty a tepelného toku při prostupu tepla válcovou stěnou

Jak je patrné z Obr. 1.4, prostup tepla válcovou stěnou se skládá z přestupu tepla na straně syté páry (kondenzátu), jenž popisuje součinitel přestupu tepla α_s , dále se skládá z vedení tepla válcovou stěnou, závisující na součiniteli tepelné vodivosti materiálu stěny λ a současně na tloušťce válcové stěny, která je u válcové stěny vymezena vnějším a vnitřním průměrem trubky, na straně vody je opět přestup tepla α_w .

K určení výsledného součinitele prostupu tepla k je tedy nutné nejdříve zjistit jednotlivé součinitele přestupu tepla a také vedení tepla válcovou stěnou.

1.1.1.1 Součinitel přestupu tepla na straně páry α_s :

Při kondenzaci syté páry se vytváří na vnějším povrchu teplosměnné plochy (trubky) vrstva kondenzátu, která vlivem gravitace stéká na nižší trubku. Vrstva kondenzátu výrazně ovlivňuje hodnotu součinitele přestupu tepla α_s . Na vrchních trubkách, kde je vrstva kondenzátu nejmenší, dosahuje součinitel přestupu tepla α_s maximálních hodnot pro daný trubkový svazek. Oproti tomu na spodních trubkách, kde vrstva kondenzátu je výrazně ovlivněna stékajícím kondenzátem z vyšších trubek, dosahuje součinitel přestupu tepla α_s minimálních hodnot pro daný trubkový svazek.



Obr. 1.5 Zjednodušené schéma snižování součinitele přestupu tepla

Parametry potřebné pro výpočet α_s :

Entalpie syté páry i'' : pro tlak $P_s = 0,1625[\text{MPa}]$ byla z tabulek [2] stanovena hodnota

$$i'' = 2696,750 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] = 2696750 \left[\frac{\text{J}}{\text{kg}} \right]$$

Entalpie syté kapaliny (kondenzátu) i' : pro tlak $P_s = 0,1625[\text{MPa}]$ byla z tabulek [2] stanovena hodnota

$$i' = 477,335 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] = 477335 \left[\frac{\text{J}}{\text{kg}} \right]$$

Teplota vnější stěny trubky t_l : předběžně zvolena hodnota $t_l = 97[^\circ\text{C}]$, která bude později vypočtena z iteračního výpočtu

Gravitační zrychlení g : stanovena hodnota $g = 9,807 [\text{m/s}]$

Dynamická viskozita η' : pro tlak $P_s = 0,1625[\text{MPa}]$ a teplotu $t_s = 113,769[^\circ\text{C}]$ byla z tabulek [2] stanovena interpolací hodnota

$$\eta' = 246,181 \cdot 10^{-6} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}} \right]$$

Tepelná vodivost kondenzátu λ' : pro tlak $P_s = 0,1625[\text{MPa}]$ byla z tabulek [2] stanovena interpolací hodnota

$$\lambda' = 682,158 \left[\frac{\text{mW}}{\text{K} \cdot \text{m}} \right] = 0,682 \left[\frac{\text{W}}{\text{K} \cdot \text{m}} \right]$$

Latentní teplo l : $l = i'' - i' = 2696750 \left[\frac{\text{J}}{\text{kg}} \right] - 477335 \left[\frac{\text{J}}{\text{kg}} \right] = 2219415 \left[\frac{\text{J}}{\text{kg}} \right]$

Hustota syté páry ρ'' : pro tlak $P_s = 0,1625[\text{MPa}]$ byla z tabulek [2] stanovena interpolací hodnota

$$\rho'' = 0,930 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

Hustota kondenzátu ρ' : pro tlak $P_s = 0,1625[\text{MPa}]$ byla z tabulek [2] stanovena interpolací hodnota

$$\rho' = 948,044 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

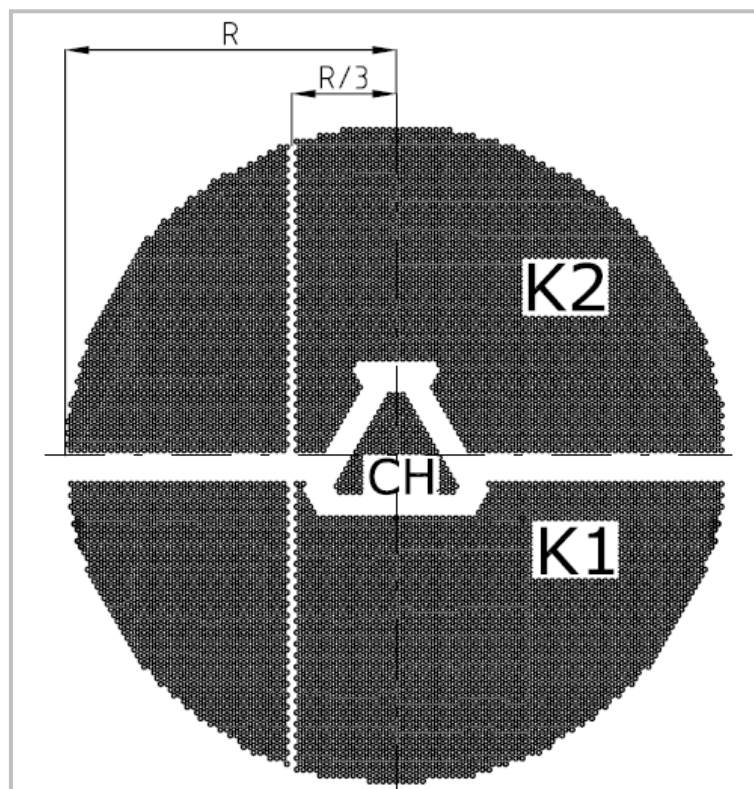
Součinitel přestupu tepla na straně páry pro vrchní trubku α_s :

[1] Nusselt ze svých experimentů kondenzace syté páry na horizontálních trubce stanovil vzorec na výpočet součinitele přestupu tepla na vrchní trubce α_s .

$$\begin{aligned} \alpha_s &= 0,728 \cdot \left[\frac{\lambda'^3 \cdot \rho' \cdot (\rho' - \rho'') \cdot g \cdot l}{\eta' \cdot (t_s - t_l) \cdot d} \right]^{\frac{1}{4}} = \\ &= 0,728 \cdot \left[\frac{\left(0,682 \left[\frac{\text{W}}{\text{K} \cdot \text{m}} \right] \right)^3 \cdot 948,044 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot \left(948,044 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] - 0,930 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \right) \cdot 9,807 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \cdot 2219415 \left[\frac{\text{J}}{\text{kg}} \right]}{0,000246 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}} \right] \cdot (113,769[^\circ\text{C}] - 97[^\circ\text{C}]) \cdot \frac{20}{1000} [\text{m}]} \right]^{\frac{1}{4}} = \\ &= 12052,891 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right] \end{aligned}$$

Jelikož byla jako nástřelová teplota vnější stěny trubky použita stejná teplota pro všechny materiály teplosměnné plochy, vychází součinitel přestupu tepla na straně páry pro vrchní trubku α_S pro všechny materiály stejně.

Velikost součinitele přestupu tepla klesá s počtem trubek řazených pod sebou vlivem stékajícího kondenzátu, proto nemůže být součinitel přestupu tepla pro vrchní trubku brán jako součinitel reprezentující celý trubkový svazek. Bylo nutné najít takovou trubku v celém trubkovém svazku, pro kterou byla vypočítána průměrná hodnota součinitele přestupu tepla reprezentující celý trubkový svazek. K nalezení této trubky byla použita grafická metoda v programu AutoCAD na již vytvořeném síťovém modelu trubkového svazku.



Obr.1.6 Schéma příčného řezu trubkovým svazkem a nalezení pozice sloupce s průměrným počtem řad trubek pod sebou

V zjištěném sloupci byly spočítány trubky řazené pod sebou. Jelikož se počet trubek v síťovém modelu liší podle druhu materiálu teplosměnné plochy, je i počet trubek řazených pod sebou v tomto sloupci pro různé materiály odlišný.

Tab.1.5 Průměrný počet trubek řazených pod sebou n_{ty} [-]

17 248.4	104	TiGr2	102
17 348.4	104	12 021.1	120
VLX 439	110	CuZn20Al2As	116

Průměrná hodnota součinitele přestupu tepla reprezentující celý trubkový svazek nebyla spočítána pro celkový počet n_{ty} , ale pro hodnotu N odpovídající $2/3 n_{ty}$.

$$N = \frac{2}{3} \cdot n_{ty} = \frac{2}{3} \cdot 104 = 69,33 \Rightarrow 70$$

Tab.1.6 Počet trubek pod sebou N pro výpočet průměrného součinitele přestupu tepla

17 248.4	70	TiGr2	68
17 348.4	70	12 021.1	80
VLX 439	74	CuZn20Al2As	78

Součinitel přestupu tepla na straně páry na N -té trubce α_{SN} :

Dle [1] stačí pro výpočet průměrného součinitele přestupu tepla v trubkovém svazku přepočítat součinitel přestupu tepla pro vrchní trubku α_S podle následujícího vzorce:

$$\alpha_{SN} = \alpha_S \cdot 1,24 \cdot N^{-\frac{1}{4}} = 12052,891 \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right] \cdot 1,24 \cdot 70^{-\frac{1}{4}} = 5179,375 \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$$

Tab.1.7 Hodnoty součinitele přestupu tepla na straně páry pro N -tou trubku [W/m^2K]

17 248.4	5179,375	TiGr2	5592,685
17 348.4	5179,375	12 021.1	5370,010
VLX 439	5488,103	CuZn20Al2As	5415,716

1.1.1.2 Součinitel přestupu tepla na straně vody α_W :

Nejdříve se vypočítalo Reynoldsovo a Prandtlovo bezrozměrné číslo, z nich se vypočítalo Nusseltovo číslo a následně se z něj vypočítal součinitel přestupu tepla na straně vody α_W .

Parametry potřebné pro výpočet α_W :

Střední teplota oběhové vody t_{Wstr} :

$$t_{Wstr} = \frac{t_{Win} + t_{Wout}}{2} = \frac{70[^\circ C] + 94,3[^\circ C]}{2} = 82,150[^\circ C]$$

Dynamická viskozita oběhové vody η_W :

pro tlak $P_W = 2[MPa]$ a teplotu $t_{Wstr} = 82,150[^\circ C]$ byla z tabulek [2] stanovena interpolací hodnota

$$\eta_W = 350,811 \cdot 10^{-6} \left[\frac{kg}{m \cdot s} \right]$$

Hustota oběhové vody pro střední teplotu ρ_{Wstr} :

byla již v předchozím výpočtu stanovena hodnota

$$\rho_{Wstr} = 970,934 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

Kinematická viskozita oběhové vody ν_W :

$$\begin{aligned} \nu_W &= \frac{\eta_W}{\rho_{Wstr}} = \frac{350,811 \cdot 10^{-6} \left[\frac{kg}{m \cdot s} \right]}{970,934 \left[\frac{kg}{m^3} \right]} = \\ &= 3,613 \cdot 10^{-7} \left[\frac{m^2}{s} \right] \end{aligned}$$

Měrná tepelná kapacita oběhové vody c_{pW} :pro tlak $P_W = 2[\text{MPa}]$ a teplotu $t_{Wstr} = 82,150[^\circ\text{C}]$ byla z tabulek [2]
stanovena interpolací hodnota

$$c_{pW} = 4197,261 \left[\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$$

Součinitel tepelné vodivosti vody λ_W :pro tlak $P_W = 2[\text{MPa}]$ a teplotu $t_{Wstr} = 82,150[^\circ\text{C}]$ byla z tabulek [2]
stanovena interpolací hodnota

$$\lambda_W = 0,668 \left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$$

Součinitel teplotní vodivosti vody a_W :

$$a_W = \frac{\lambda_W}{c_{pW} \cdot \rho_{Wstr}} = \frac{0,668 \left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]}{4197,261 \left[\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right] \cdot 970,934 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]} = 1,641 \cdot 10^{-7} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]$$

Rychlost proudění oběhové vody w :**Tab.1.8** Hodnoty rychlosti proudění oběhové vody [m/s]

17 248.4	2,1	TiGr2	2
17 348.4	2,1	12 021.1	1,9
VLX 439	2	CuZn20Al2As	2

Vnitřní průměr trubek d_{int} :

viz. Tab.1.3

Reynoldsovo číslo Re :

$$Re = \frac{w \cdot d_{int}}{\nu_W} = \frac{2,1 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \cdot \frac{18}{1000} [\text{m}]}{3,613 \cdot 10^{-7} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]} = 104618,6$$

Tab.1.9 Hodnoty Re [-]

17 248.4	104618,6	TiGr2	102957,988
17 348.4	104618,6	12 021.1	89396,317
VLX 439	99636,762	CuZn20Al2As	94101,387

Prandtlovo číslo Pr :

$$Pr = \frac{\nu_W}{a_W} = \frac{3,613 \cdot 10^{-7} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]}{1,641 \cdot 10^{-7} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]} = 2,202$$

Hodnoty Pr jsou pro všechny materiály stejnéKonstanty C , m , n pro výpočet Nu : dle [5]

$$C = 0,023 \quad \text{pro} \quad 0,6 \leq Pr \leq 160, \frac{L}{D} \geq 10$$

$$m = 0,8$$

$$n = 0,4 \quad \text{tekutina v trubce se ohřívá}$$

Nusseltovo číslo Nu :

$$Nu = C \cdot Re^m \cdot Pr^n = 0,023 \cdot 104618,6^{0,8} \cdot 2,202^{0,4} = 326,978$$

Tab.1.10 Hodnoty Nu [-]

17 248.4	326,978	TiGr2	322,819
17 348.4	326,978	12 021.1	288,328
VLX 439	314,461	CuZn20Al2As	300,406

Součinitel přestupu tepla na straně vody α_W :

$$\alpha_W = \frac{Nu \cdot \lambda_W}{d_{\text{int}}} = \frac{326,978 \cdot 0,669 \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]}{\frac{18}{1000} [m]} = 12148,581 \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$$

Tab.1.11 Hodnoty α_W [W/m²K]

17 248.4	12148,581	TiGr2	11607,161
17 348.4	12148,581	12 021.1	11342,733
VLX 439	11683,531	CuZn20Al2As	11817,859

1.1.1.3 Tepelné odpory:

Tepelný odpor proti konvekci na straně syté páry R_S :

$$R_S = \frac{1}{\alpha_{SN}} = \frac{1}{5179,375 \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]} = 0,193 \cdot 10^{-3} \left[\frac{m^2 \cdot K}{W} \right]$$

Tab.1.12 Hodnoty R_S [m²K/W]

17 248.4	0,193 x 10 ⁻³	TiGr2	0,179 x 10 ⁻³
17 348.4	0,193 x 10 ⁻³	12 021.1	0,186 x 10 ⁻³
VLX 439	0,182 x 10 ⁻³	CuZn20Al2As	0,185 x 10 ⁻³

Tepelný odpor proti vedení tepla stěnou trubky R_t :

$$R_t = \frac{d}{2 \cdot \lambda} \cdot \ln \frac{d}{d_{\text{int}}} = \frac{\frac{20}{1000} [m]}{2 \cdot 15 \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]} \cdot \ln \frac{\frac{20}{1000} [m]}{\frac{18}{1000} [m]} = 7,024 \cdot 10^{-5} \left[\frac{m^2 \cdot K}{W} \right]$$

Tab.1.13 Hodnoty R_t [m²K/W]

17 248.4	7,024 x 10 ⁻⁵	TiGr2	3,629 x 10 ⁻⁵
17 348.4	7,024 x 10 ⁻⁵	12 021.1	3,611 x 10 ⁻⁵
VLX 439	4,390 x 10 ⁻⁵	CuZn20Al2As	1,625 x 10 ⁻⁵

Tepelný odpor proti konvekci na straně oběhové vody R_W :

$$R_W = \frac{1}{\alpha_W} \cdot \frac{d}{d_{\text{int}}} = \frac{1}{12148,581 \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]} \cdot \frac{\frac{20}{1000} [m]}{\frac{18}{1000} [m]} = 9,146 \cdot 10^{-5} \left[\frac{m^2 \cdot K}{W} \right]$$

Tab.1.14 Hodnoty R_W [m^2K/W]

17 248.4	$9,146 \times 10^{-5}$	TiGr2	$9,264 \times 10^{-5}$
17 348.4	$9,146 \times 10^{-5}$	12 021.1	$10,372 \times 10^{-5}$
VLX 439	$9,510 \times 10^{-5}$	CuZn20Al2As	$9,955 \times 10^{-5}$

Součinitel prostupu tepla válcovou stěnou trubky k :

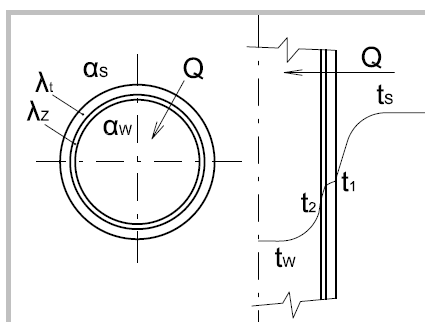
$$k = \frac{1}{R_s + R_t + R_w} = \frac{1}{0,193 \cdot 10^{-3} \left[\frac{m^2 \cdot K}{W} \right] + 7,024 \cdot 10^{-5} \left[\frac{m^2 \cdot K}{W} \right] + 9,146 \cdot 10^{-5} \left[\frac{m^2 \cdot K}{W} \right]} =$$

$$= 2818,696 \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$$

Tab.1.15 Hodnoty k [W/m^2K]

17 248.4	2818,696	TiGr2	3249,615
17 348.4	2818,696	12 021.1	3066,968
VLX 439	3113,197	CuZn20Al2As	3328,342

Za provozu výměníku tepla bude docházet v trubkách k tvorbě vrstvy nánosů. Vrstva nánosů se negativně projeví na celkovém prostupu tepla z jednoho média do druhého, proto je potřeba opravit předchozí vypočtený součinitel prostupu tepla k opravným součinitelem zanesení $Z = 0,9$.



Obr. 1.7 Schéma průběhu teploty a tepelného toku při prostupu tepla válcovou stěnou za přítomnosti nánosů na vnitřní stěně trubky

Součinitel prostupu tepla s vrstvou nánosů k_z :

$$k_z = k \cdot Z = 2818,696 \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right] \cdot 0,9 = 2536,826 \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$$

Tab.1.16 Hodnoty k_z [W/m^2K]

17 248.4	2536,826	TiGr2	2924,654
17 348.4	2536,826	12 021.1	2760,271
VLX 439	2801,878	CuZn20Al2As	2995,508

1.1.1.4 Teplota na vnější stěně trubky t_l :

$$\begin{aligned}
 t_l &= \left[(273,15 + t_s) - \left(\left(\frac{k_z}{\alpha_{SN}} \right) \cdot (t_s - t_{Wstr}) \right) \right] - 273,15 = \\
 &= \left[(273,15 + 113,769) [K] - \left(\left(\frac{2536,826 \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]}{5179,375 \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]} \right) \cdot (113,769 - 82,15) [K] \right) \right] - 273,15 = \\
 &= 98,283 [^\circ C]
 \end{aligned}$$

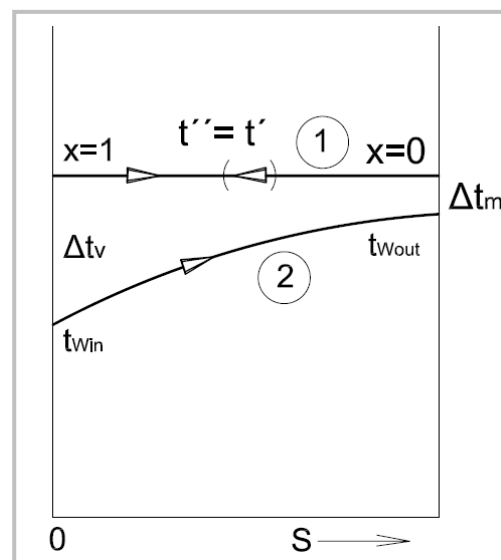
Tab.1.17 Hodnoty t_l [$^\circ C$]

17 248.4	98,283	TiGr2	97,234
17 348.4	98,283	12 021.1	97,517
VLX 439	97,627	CuZn20Al2As	96,280

Tato vypočtená teplota byla dosazena zpětně do výpočtu α_s v kapitole 1.1.1.1 a iteračním výpočtem byla stanovena konečná hodnota součinitele prostupu tepla válcovou stěnou trubky s vrstvou nánosu k_z .

Konečná hodnota součinitele prostupu tepla k_z :**Tab.1.18** Konečné hodnoty k_z [W/m^2K]

17 248.4	2567,872	TiGr2	2931,335
17 348.4	2567,872	12 021.1	2774,097
VLX 439	2818,864	CuZn20Al2As	2974,144

1.1.2 Střední logaritmický teplotní spád Δt_L **Graf. 1.1** Průběh teplot v kondenzátoru s konstantní teplotou kondenzace páry a ohřívání druhého média

Na Obr.1.1 z počátku kapitoly 1.1 je znázorněno vzájemné proudění obou médií výměníkem tepla. Jedná se o kombinované proudění, pro které se střední logaritmický teplotní spád Δt_L pro případ kondenzátoru s konstantní teplotou kondenzace páry viz. Graf.1.1 počítá jako pro protiproud.

Teplotní spád na vstupu Δt_v : $\Delta t_v = t_s - t_{win} = 113,769[^\circ\text{C}] - 70[^\circ\text{C}] = 43,769[^\circ\text{C}]$

Teplotní spád na výstupu Δt_m : $\Delta t_m = t_s - t_{wout} = 113,769[^\circ\text{C}] - 94,3[^\circ\text{C}] = 19,469[^\circ\text{C}]$

Střední logaritmický teplotní spád Δt_L : dle [3]

$$\Delta t_L = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{43,769[^\circ\text{C}] - 19,469[^\circ\text{C}]}{\ln \frac{43,769[^\circ\text{C}]}{19,469[^\circ\text{C}]}} = 29,997[^\circ\text{C}]$$

1.1.3 Přenášený tepelný výkon Q

$$\begin{aligned} \dot{Q} &= \dot{M}_{W\max} \cdot c_{pW} \cdot (t_{wout} - t_{win}) = 2222,222 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] \cdot 4197,261 \left[\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right] \cdot (94,3 - 70)[^\circ\text{C}] = \\ &= 226652114,3[\text{W}] \end{aligned}$$

1.1.4 Teplosměnná plocha S

Z rovnice tepelné bilance [3]:

$$\dot{Q} = \dot{M}_{W\max} \cdot c_{pW} \cdot (t_{wout} - t_{win}) = k_Z \cdot \Delta t_L \cdot S[\text{W}] \quad (1)$$

$$\dot{Q} = S \cdot k_Z \cdot \Delta t_L [\text{W}] \Rightarrow S = \frac{\dot{Q}}{k_Z \cdot \Delta t_L} = \frac{226652114,3[\text{W}]}{2567,872 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right] \cdot 29,997[^\circ\text{C}]} = 2942,465[\text{m}^2]$$

Tab.1.19 Teplosměnná plocha S [m^2]

17 248.4	2942,465	TiGr2	2575,449
17 348.4	2942,465	12 021.1	2721,428
VLX 439	2678,209	CuZn20Al2As	2538,379

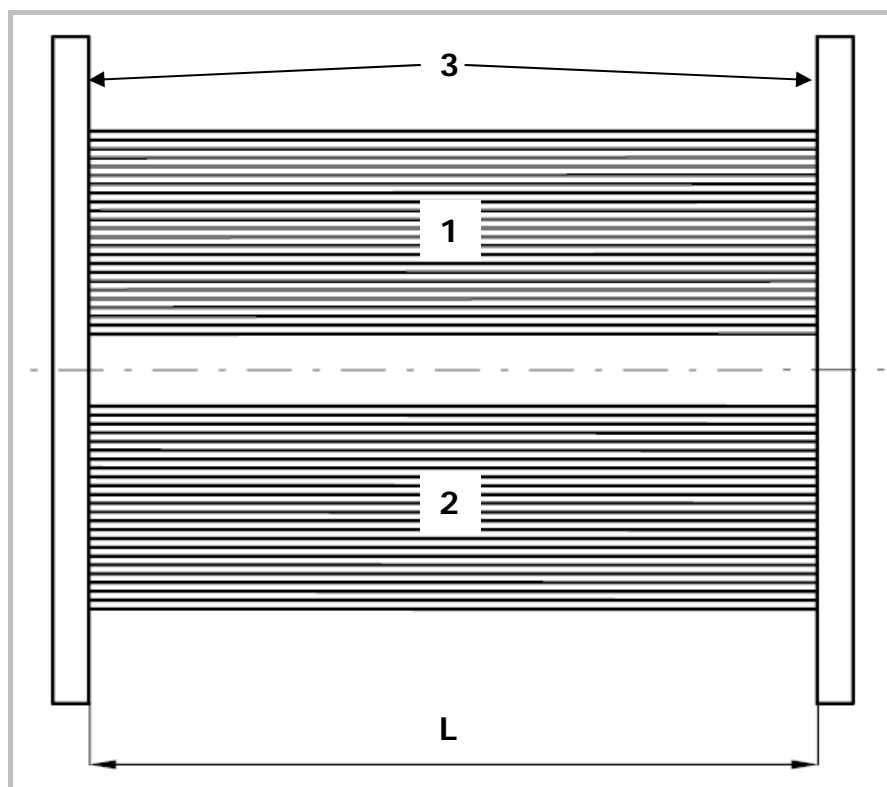
1.1.5 Délka trubkového svazku L

Pro návrh rozměrů výměníku tepla je třeba určit délku trubkového svazku. Jelikož je nutné podle zadání uvažovat výměník jako dvoucestný, je potřeba velikost celkové teplosměnné plochy brát jako poloviční.

$$L = \frac{S}{2 \cdot \pi \cdot d \cdot n_{tr}} = \frac{2942,465[\text{m}^2]}{2 \cdot \pi \cdot \frac{20}{1000}[\text{m}] \cdot 4283} = 5,462[\text{m}]$$

Tab.1.20 Délka trubkového svazku L [m]

17 248.4	5,462	TiGr2	4,866
17 348.4	5,462	12 021.1	4,080
VLX 439	4,738	CuZn20Al2As	4,006

**Obr.1.8** Jednoduché schéma teplosměnné plochy o délce L dvoucestného výměníku bez uvažování vlivu chladiče parovzdušní směsi. Dvě poloviny teplosměnné plochy (1) a (2), trubkovnice (3).

1.2 Výpočet výměníku se zahrnutím chladiče

V předběžném výpočtu v kap.1.1 byly vypočteny základní rozměry výměníků tepla pro zadané materiály teplosměnných ploch. Do výpočtu nebyl zahrnut vliv integrovaného chladiče parovzdušní směsi. Předpokládá se, že chladič bude mít vliv na nárůst velikosti potřebné teplosměnné plochy a tedy i délky trubkového svazku L .

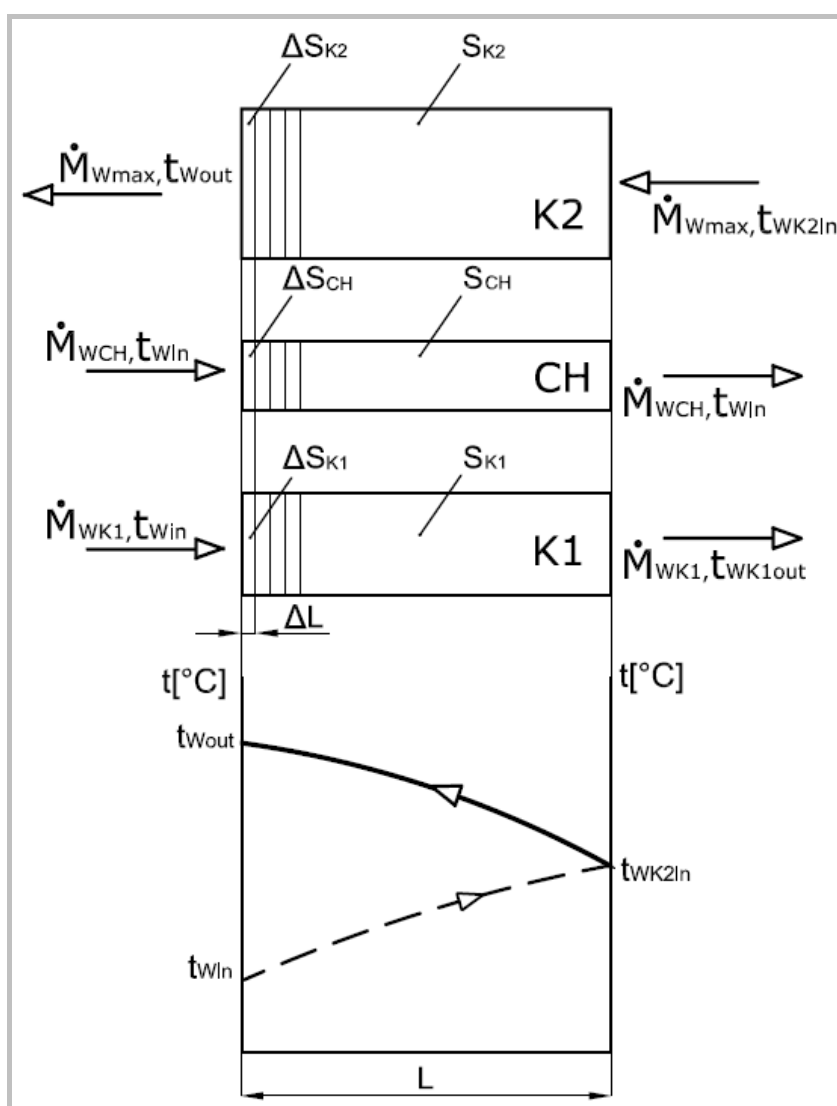
V Obr. 1.1 na str.16 jsou znázorněny jednotlivé teplosměnné plochy K_1 , K_2 a CH , jejichž velikost má vliv na ohřev topné vody. V následujících podkapitolách bude tento jejich vliv propočítán a nakonec bude určena celková délka výměníku L a také celková teplosměnná plocha S .

Jednotlivé teplosměnné plochy S_{K1} , S_{K2} a S_{CH} jsou rozděleny na elementární dílky o ploše ΔS , jejichž velikost je závislá na jejich délce ΔL . Ta je pro všechny tři části stejně velká a to 0,1m. V každém takovém elementárním dílku bude spočtena změna teploty oběhové vody. Tyto

dílký budou za sebe vkládány a to až do pevně omezené délky $L_{max} = 10\text{m}$. Výsledná délka trubkového svazku L bude taková, kdy křivka klesající teploty v K2 z hodnoty t_{Wout} protne křivku rostoucí teploty v K1+CH z hodnoty t_{Win} v teplotě t_{WK2in} viz. Obr.1.9. Proto byla velikost L_{max} stanovena s dostatečnou rezervou, aby k protnutí obou křivek došlo v mezích $<0\text{m}; 10\text{m}>$.

Součinitel prostupu tepla k a měrná tepelná kapacita c_{pW} se bude s rostoucí teplotou oběhové vody měnit. Bere se v úvahu zanesení výměníku, tedy opravný součinitel zanesení $Z = 0,9$.

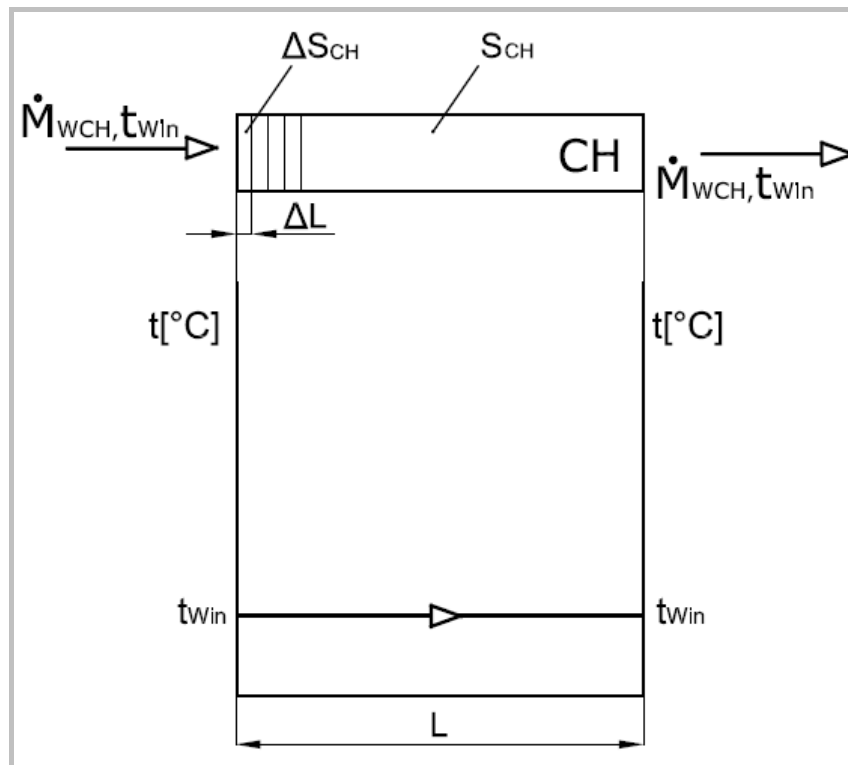
Jelikož se jedná o velmi velké množství dat, bude ukázkový výpočet proveden pouze pro materiál **17 248.4** a až teprve pro výslednou délku L a velikost teplosměnné plochy S budou uvedeny výsledky pro ostatní materiály.



Obr.1.9 Schéma jednotlivých teplosměnných ploch S_{K1} , S_{K2} a S_{CH} , elementárních dílků ploch ΔS_{K1} , ΔS_{K2} a ΔS_{CH} o délce ΔL a celkového průběhu teplot

1.2.1 Výpočet části CH

CH představuje tu část teplosměnné plochy, kde je umístěn integrovaný chladič parovzdušní směsi. Teplota oběhové vody na vstupu do CH je stejná jako teplota vody na výstupu z něj, tedy t_{Win} .



Obr.1.10 Schéma teplosměnné plochy S_{CH} , ΔS_{CH} a průběhu teploty oběhové vody v části CH

Potřebné parametry pro výpočet:

Počet trubek v jedné cestě n_{tr} : z předběžného výpočtu pro materiál 17 248.4 je brána hodnota $n_{tr} = 4283$

Počet trubek v chladiči n_{trCH} : voleno $n_{trCH} = 205$

Počet trubek v K1 n_{trK1} : $n_{trK1} = n_{tr} - n_{trCH} = 4283 - 205 = 4078$

Průtočný průřez jedné trubky S_{tr} :
$$S_{tr} = \frac{\pi \cdot d_{int}^2}{4} = \frac{\pi \cdot \frac{18}{1000} [m]^2}{4} = 0,000254 [m^2]$$

Průtočný průřez všech trubek v K1 S_{trK1} : $S_{trK1} = n_{trK1} \cdot S_{tr} = 4078 \cdot 0,000254 [m^2] = 1,038 [m^2]$

Hmotnostní průtok vody v jedné cestě M_{Wmax} : dle zadání $M_{Wmax} = 2222,222 [kg/s]$

Hmotnostní průtok vody v K1 M_{WK1} :

$$\dot{M}_{WK1} = S_{trK1} \cdot \rho_{Wstr} \cdot w = 1,038 [m^2] \cdot 970,934 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \cdot 2,1 \left[\frac{m}{s} \right] = 2115,881 \left[\frac{kg}{s} \right]$$

Hmotnostní průtok vody v CH M_{WCH} :

$$M_{WCH} = M_{W\max} - M_{WK1} = 2222,222 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] - 2115,881 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] = 106,341 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$$

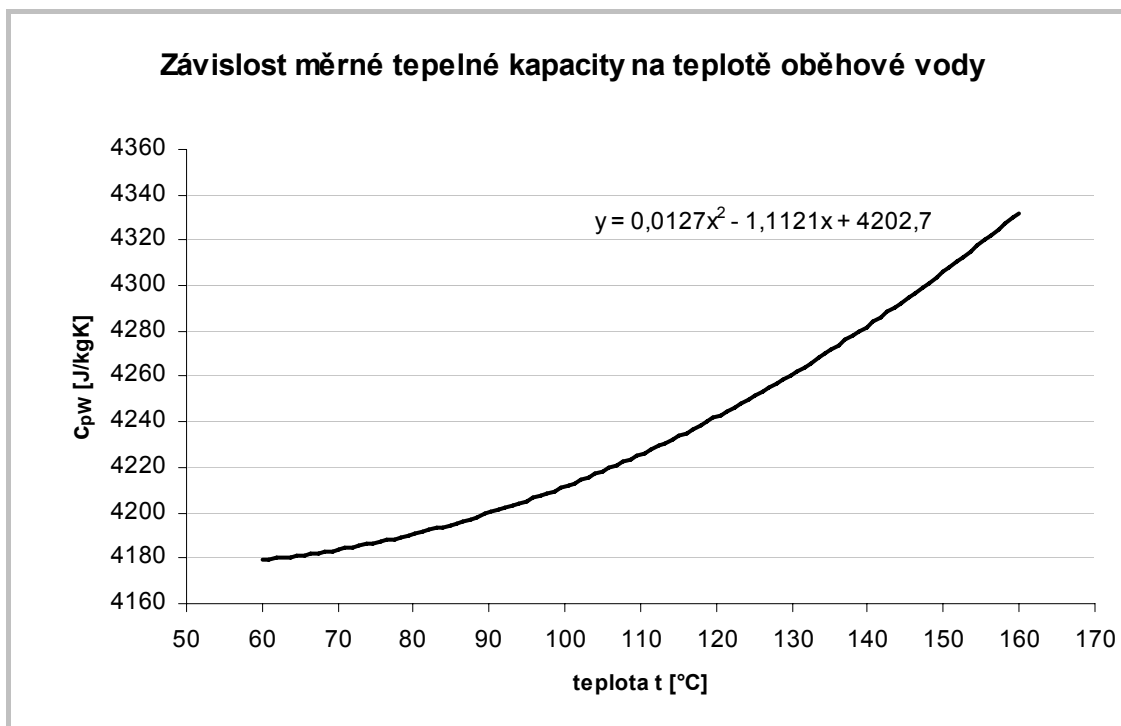
Určení rovnice závislosti měrné tepelné kapacity na teplotě oběhové vody c_{pW} :

Z tabulek [2] pro tlak $P_W = 2\text{MPa}$ byly zjištěny pro dané teploty hodnoty měrné tepelné kapacity vody.

Tab.1.21. Hodnoty c_{pW} pro $P_W = 2\text{MPa}$

Teplota oběhové vody t_W [°C]	Měrná tepelná kapacita oběhové vody c_{pW} [J/kgK]
60	4178,6
80	4191,4
100	4212,3
120	4241,8
140	4281,2
160	4333

V programu MS Excel, byla vytvořen graf, popisující tuto závislost viz. Graf.1.2 a také rovnice spojnice trendů: $y = 0,0127 \cdot x^2 - 1,1121 \cdot x + 4202,7$



Graf.1.2 Závislost měrné tepelné kapacity na teplotě vody

Další potřebné vztahy:

$$T[\text{K}] = t[^\circ\text{C}] + 273,15$$

$$c_{pW} = 0,0127 \cdot t^2 - 1,1121 \cdot t + 4202,7 = 0,0127 \cdot 70^2 - 1,1121 \cdot 70 + 4202,7 = 4187,083 \left[\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$$

V Obr.1.10 je vidět, že se teplota vody v celé délce CH nemění, tedy i hodnota měrné tepelné kapacity vody je také stejná. Pro přehlednost jsou hodnoty pro každý úsek uvedeny v tabulce:

Tab.1.22. Tabulka vypočtených hodnot pro CH úsek $L_{max} < 0\text{m}; 0,7\text{m}>$

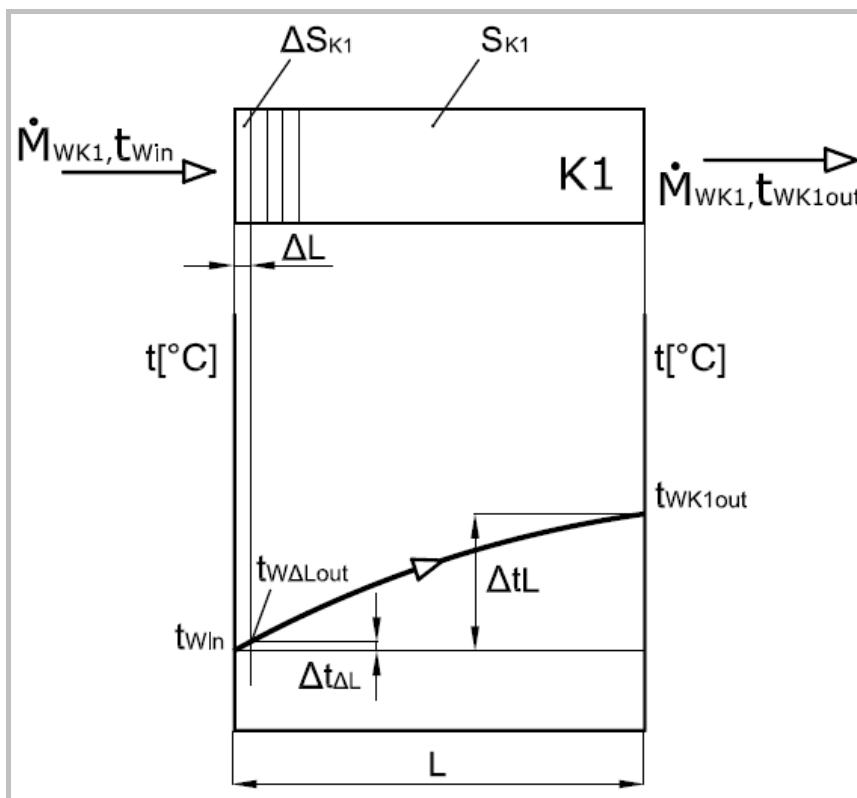
ΔL	[m]	0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
L	[m]	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
t_{Win}	[°C]	70	70	70	70	70	70	70	70
T_{Win}	[K]	343,15	343,15	343,15	343,15	343,15	343,15	343,15	343,15
c_{pW}	[J/kgK]	4187,083	4187,083	4187,083	4187,083	4187,083	4187,083	4187,083	4187,083

Z výsledků předběžného výpočtu, kdy délka trubkového svazku vyšla pro materiál 17248.4 $L = 5,462\text{m}$, je zaměřena pozornost na úsek $L_{max} < 5,3\text{m}; 6,1\text{m}>$. Výsledky pro tento úsek jsou znázorněny v následující tabulce Tab.1.23.

Tab.1.23. Tabulka vypočtených hodnot pro CH úsek $L_{max} < 5,3\text{m}; 6,1\text{m}>$

0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
5,3	5,4	5,5	5,6	5,7	5,8	5,9	6	6,1
70	70	70	70	70	70	70	70	70
343,15	343,15	343,15	343,15	343,15	343,15	343,15	343,15	343,15
4187,083	4187,083	4187,083	4187,083	4187,083	4187,083	4187,083	4187,083	4187,083

1.2.2 Výpočet části K1



Obr.1.11. Schéma teplosměnné plochy S_{K1} , ΔS_{K1} a průběhu teploty oběhové vody v části K1

V části K1 dochází oproti části CH k ohřevu oběhové vody. Z teploty t_{Win} se voda ohřívá na úseku o délce ΔL na teplotu $t_{W\Delta Lout}$. Tato výstupní teplota je brána pro následující úsek jako vstupní.

Potřebné rovnice pro výpočet:

Rovnice tepelné bilance [3]: $\Delta \dot{Q} = \dot{M}_A \cdot c_{pA} \cdot \Delta t_A = \dot{M}_B \cdot c_{pB} \cdot \Delta t_B \quad [W] \quad (2)$

Rovnice přenosu tepla [3]: $\Delta \dot{Q} = k \cdot \Delta S \cdot (t_A - t_B) \quad [W] \quad (3)$

Z toho se získá:
$$\Delta t_B = \frac{k \cdot \Delta S}{\dot{M}_B \cdot c_{pB}} \cdot (t_A - t_B) \quad [^{\circ}C]$$

kde indexy:

A – strana páry, B – strana oběhové vody

Nejprve byly vypočteny u každého elementárního dílku vstupní a výstupní teploty oběhové vody a to za pomoci konstantního součinitele prostupu tepla válcovou stěnou s vrstvou nánosu k_Z vypočteného v předběžném výpočtu na konci kapitoly 1.1.1. Z obou těchto teplot byla vypočtena střední teplota v elem. dílku a podle stejných vztahů, které jsou uvedeny v kap.1.1.1, byl přepočten pro tuto teplotu součinitel prostupu tepla válcovou stěnou s vrstvou nánosu k_Z pro každý elem. dílek zvlášť. Po dokončení iteračního výpočtu byly stanoveny konečné hodnoty vstupních, výstupních a středních teplot vody v každém elem. dílku a také součinitel prostupu tepla k_Z .

Tab.1.24. Ukázkový výpočet výstupní teploty v jednom elem. dílku pro K1

$\Delta L \text{ [m]}$	0,1
$\Delta S_{K1} \text{ [m}^2\text{]}$	$n_{trK1} \cdot \Delta L \cdot \pi \cdot d$
$t_{Win} \text{ [}^{\circ}\text{C]}$	t_{Win}
$c_{pWK1} \text{ [J/kgK]}$	$0,0127 \cdot t_{Win}^2 - 1,1121 \cdot t_{Win} + 4202,7$
$T_{Win} \text{ [K]}$	$t_{Win} + 273,15$
$\Delta T_W \text{ [K]}$	$\frac{k_Z \cdot \Delta S_{K1}}{M_{WK1} \cdot c_{pW}} \left[(t_s + 273,15) - T_{Win} \right]$
$T_{Wout} \text{ [K]}$	$T_{Win} + \Delta T_W$
$t_{Wout} \text{ [}^{\circ}\text{C]}$	$T_{Wout} - 273,15$
$t_{Wsrt} \text{ [}^{\circ}\text{C]}$	$\frac{t_{Win} + t_{Wout}}{2}$

Konečné výsledné hodnoty pro jednotlivé elem. dílky K1 jsou znázorněny v následujících tabulkách:

Tab.1.25. Tabulka výsledných hodnot pro K1 úsek $L_{max} <0\text{m};0,6\text{m}>$

ΔL	[m]	0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
L	[m]	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
ΔS_{K1}	[m ²]	0	25,623	25,623	25,623	25,623	25,623	25,623
t_{Win}	[°C]	70	70	70,321	70,639	70,955	71,269	71,581
c_{pWK1}	[J/kgK]	4187,083	4187,083	4187,298	4187,514	4187,731	4187,949	4188,167
T_{Win}	[K]	343,15	343,15	343,471	343,789	344,105	344,419	344,731
ΔT_W	[K]	0	0,321	0,318	0,316	0,314	0,312	0,310
T_{Wout}	[K]	343,15	343,471	343,789	344,105	344,419	344,731	345,040
t_{Wout}	[°C]	70	70,321	70,639	70,955	71,269	71,581	71,890
t_{Wsr}	[°C]	70	70,160	70,47986	70,797	71,112	71,425	71,736
k_Z	[W/m ² K]	2532,618	2533,068	2533,966	2534,860	2535,749	2536,634	2537,514

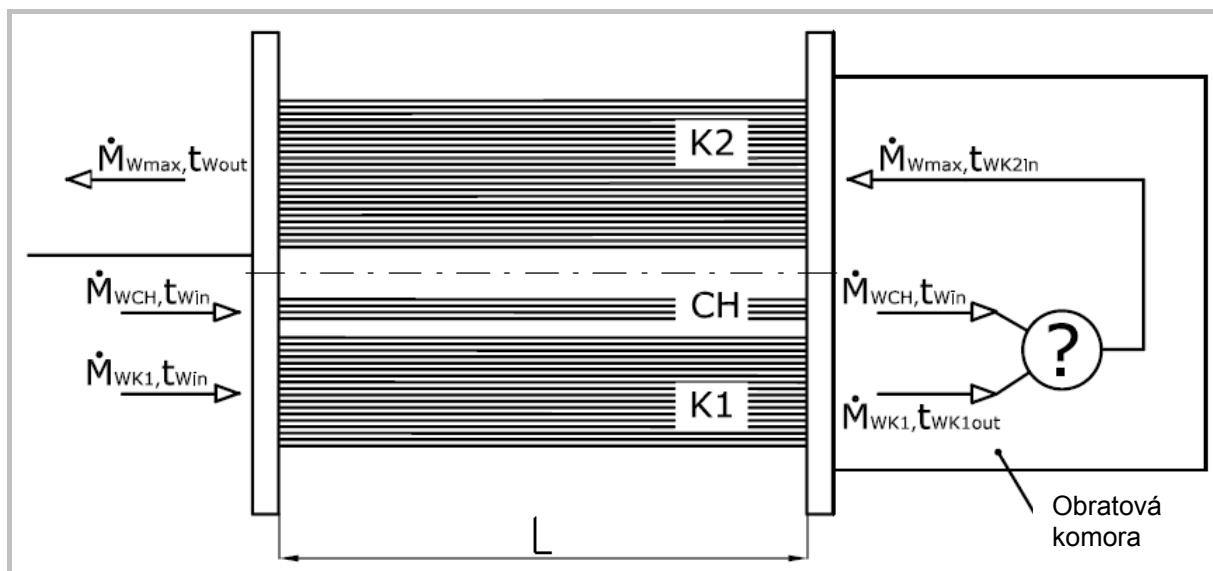
Pozornost je opět zaměřena na úsek $L_{max} <5,3\text{m};6,1\text{m}>$.

Tab.1.26. Tabulka výsledných hodnot pro K1 úsek $L_{max} <5,3\text{m};6,1\text{m}>$

0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
5,3	5,4	5,5	5,6	5,7	5,8	5,9	6	6,1
25,623	25,623	25,623	25,623	25,623	25,623	25,623	25,623	25,623
83,987	84,208	84,428	84,645	84,862	85,077	85,290	85,502	85,712
4198,881	4199,108	4199,334	4199,559	4199,785	4200,009	4200,233	4200,457	4200,680
357,137	357,358	357,578	357,795	358,012	358,227	358,440	358,652	358,862
0,221	0,219	0,218	0,216	0,215	0,213	0,212	0,210	0,209
357,358	357,578	357,795	358,012	358,227	358,440	358,652	358,862	359,070
84,208	84,428	84,645	84,862	85,077	85,290	85,502	85,712	85,920
84,098	84,318	84,537	84,754	84,969	85,183	85,396	85,607	85,816
2574,039	2574,719	2575,395	2576,068	2576,737	2577,402	2578,063	2578,721	2579,375

1.2.3 Výpočet K1+CH

Z Obr.1.1 na str.16 je patrný vliv chladiče na vstupní teplotu do obrátové komory. Řešením tohoto výpočtu bude navržení takové délky trubkového svazku L , na které se teplota na vstupu do obrátové komory (výstup K1+CH) bude rovnat teplotě na výstupu z ní (vstupu do K2) viz. Obr 1.12.



Obr.1.12 Znázornění vlivu chladiče na vstupní teplotu oběhové vody do K2, značka (?) představuje rovnici, kterou se vypočte tato teplota

Rovnice potřebné pro výpočet t_{WK2in} :

$$\dot{M}_{WK1} \cdot c_{pWt} \cdot T_{WK1out} + \dot{M}_{WCH} \cdot c_{pWt} \cdot T_{Win} = (\dot{M}_{WK1} + \dot{M}_{WCH}) \cdot c_{pWt} \cdot T_{WK2in} \quad (4)$$

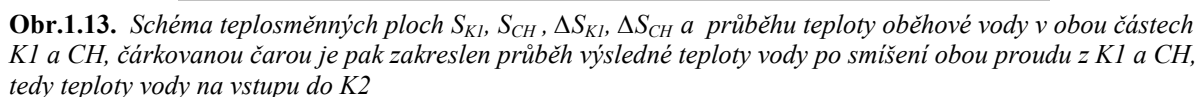
$$\text{kde} \quad \dot{M}_{WK1} + \dot{M}_{WCH} = \dot{M}_{Wmax} \quad (5)$$

Nejdříve byla zvolena nástřelová hodnota teploty t_{WK2in} , z ní byla vypočtena hodnota měrné tepelné kapacity oběhové vody c_{pWK2} . V zadání a v předchozím výpočtu byly stanoveny zbývající členy rovnice (4), jediná neznámá byla skutečná hodnota teploty t_{WK2in} . Ta se vypočetla následujícím iteračním výpočtem:

Tab.1.27. Ukázkový výpočet výstupní teploty za K1+CH

Nástřel t_{WK2in} [°C]	t_{WK2in}
Nástřel T_{WK2in} [K]	$t_{WK2in} + 273,15$
c_{pWK2} [J/kgK]	$0,0127 \cdot t_{WK2in}^2 - 1,1121 \cdot t_{WK2in} + 4202,7$
Vypočtená T_{WK2in} [K]	$\frac{\dot{M}_{WK1} \cdot c_{pWK1} \cdot T_{WK1out} + \dot{M}_{WCH} \cdot c_{pWCH} \cdot T_{Win}}{\dot{M}_{Wmax} \cdot c_{pWK2}}$
Vypočtená t_{WK2in} [°C]	$T_{WK2in} - 273,15$

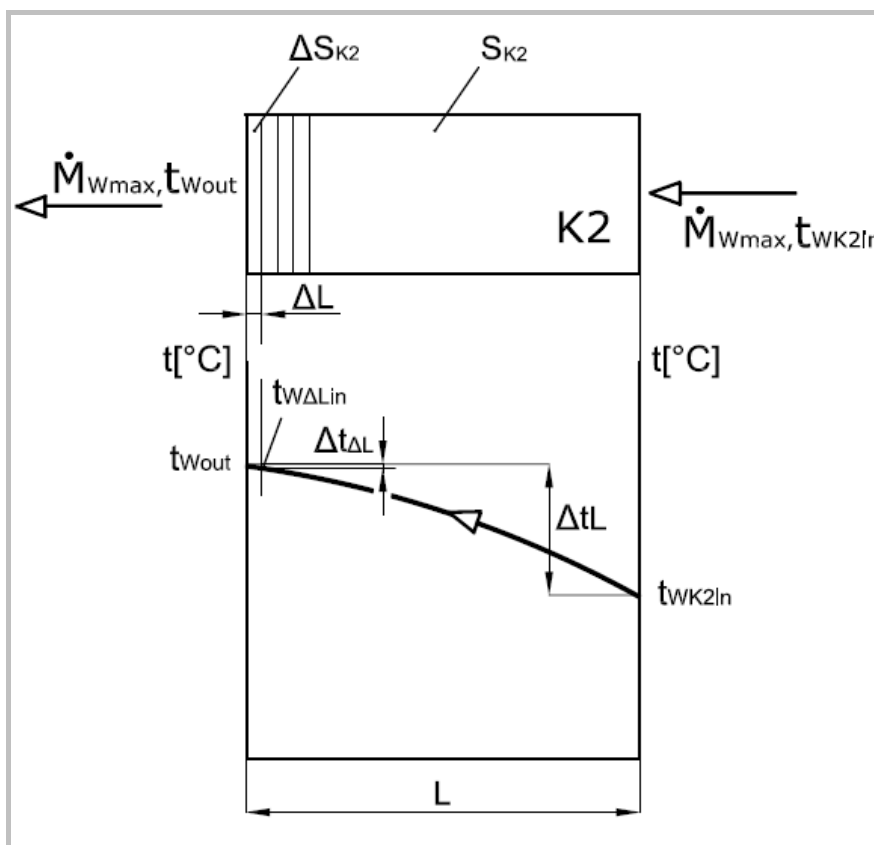
Tento výpočet byl proveden pro každý elem. dílek v celém rozsahu kontrolní délky $L_{max} < 0m; 10m >$.



ΔL	[m]	0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
L	[m]	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
t_{WK2in}	[°C]	70	70,289	70,593	70,894	71,192	71,489	71,784
T_{WK2in}	[K]	343,15	343,439	343,743	344,044	344,342	344,639	344,934
c_{pWK2}	[J/kgK]	4187,083	4187,277	4187,482	4187,688	4187,895	4188,103	4188,311
T_{WK2in}	[K]	0	343,439	343,743	344,044	344,342	344,639	344,934
t_{WK2in}	[°C]	70	70,289	70,593	70,894	71,192	71,489	71,784

0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
5,3	5,4	5,5	5,6	5,7	5,8	5,9	6	6,1
83,522	83,731	83,939	84,146	84,351	84,554	84,756	84,956	85,156
356,672	356,882	357,089	357,296	357,501	357,704	357,906	358,107	358,306
4198,410	4198,621	4198,833	4199,044	4199,255	4199,465	4199,674	4199,883	4200,092
356,672	356,882	357,089	357,296	357,501	357,704	357,906	358,107	358,306
83,522	83,731	83,939	84,146	84,351	84,554	84,756	84,956	85,156

1.2.4 Výpočet části K2

Obr.1.14. Schéma teplosměnné plochy S_{K2} , ΔS_{K2} a průběhu teploty z hodnoty t_{WK2in} na hodnotu t_{Wout}

V části K2 dochází k ohřevu oběhové vody z teploty t_{WK2in} na teplotu t_{Wout} . Teplota na vstupu do K2 t_{WK2in} je v této části neznámou. Známa je pouze teplota na výstupu z K2 t_{Wout} . K výpočtu teploty byly použity stejné vztahy jako pro výpočet části K1. Jediný rozdíl byl v tom, že při výpočtu K1 se teplotní přírůstek ΔT_W na jednotlivém elem. dílku přičítal ke vstupní teplotě do elem. dílku a vypočetla se výstupní teplota z elem. dílku. V části K2 se teplotní přírůstek ΔT_W odečítá od výstupní teploty z elem. dílku a vypočte se hodnota teploty na vstupu do elem. dílku.

Tab.1.30. Ukázkový výpočet vstupní teploty v jednom elem. dílku pro K2

ΔL [m]	0,1
ΔS_{K2} [m ²]	$n_{tr} \cdot \Delta L \cdot \pi \cdot d$
t_{Wout} [°C]	t_{Wout}
c_{pWK2} [J/kgK]	$0,0127 \cdot t_{Wout}^2 - 1,1121 \cdot t_{Wout} + 4202,7$
T_{Wout} [K]	$t_{Wout} + 273,15$
ΔT_W [K]	$\frac{k_z \cdot \Delta S_{K2}}{M_{WK2} \cdot c_{pW}} \cdot [(t_s + 273,15) - T_{Wout}]$
T_{WK2in} [K]	$T_{Wout} - \Delta T_W$
t_{WK2in} [°C]	$T_{WK2in} - 273,15$
t_{Wsrt} [°C]	$\frac{t_{WK2in} + t_{Wout}}{2}$

Potřebné parametry pro výpočet:

Počet trubek v K2 n_{trK2} : $n_{trK2} = n_{tr} = 4283$

Hmotnostní průtok vody v K2 M_{WK2} : $M_{WK2} = M_{Wmax} = 2222,222 \text{ [kg/s]}$

Tento výpočet byl proveden pro každý elem. dílek v celém rozsahu kontrolní délky $L_{max} <0\text{m};10\text{m}>$. Konečné výsledné hodnoty pro jednotlivé elem. dílky K2 jsou znázorněny v následujících tabulkách:

Tab.1.31. Tabulka výsledných hodnot pro K2 úsek $L_{max} <0\text{m};0,6\text{m}>$

ΔL	[m]	0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
L	[m]	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
ΔS_{K2}	[m ²]	0	26,911	26,911	26,911	26,911	26,911	26,911
t_{Wout}	[°C]	94,3	94,3	94,161	94,021	93,880	93,738	93,595
c_{pWK2}	[J/kgK]	4210,764	4210,764	4210,586	4210,407	4210,227	4210,047	4209,866
T_{Wout}	[K]	367,45	367,45	367,311	367,171	367,030	366,888	366,745
ΔT_W	[K]	0	0,139	0,140	0,141	0,142	0,143	0,144
T_{Win}	[K]	367,45	367,311	367,171	367,030	366,888	366,745	366,602
t_{Win}	[°C]	94,3	94,161	94,021	93,880	93,738	93,595	93,451
t_{Wsrt}	[°C]	94,3	94,231	94,091	93,951	93,809	93,667	93,523
k_z	[W/m ² K]	2606,824	2606,591	2606,124	2605,654	2605,182	2604,707	2604,229

Pozornost je opět zaměřena na úsek $L_{max} <5,3\text{m};6,1\text{m}>$.

Tab.1.32. Tabulka výsledných hodnot pro K2 úsek $L_{max} <5,3\text{m};6,1\text{m}>$

0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
5,3	5,4	5,5	5,6	5,7	5,8	5,9	6	6,1
26,911	26,911	26,911	26,911	26,911	26,911	26,911	26,911	26,911
85,628	85,429	85,228	85,026	84,823	84,618	84,412	84,204	83,995
4200,591	4200,380	4200,168	4199,956	4199,744	4199,531	4199,318	4199,104	4198,890
358,778	358,579	358,378	358,176	357,973	357,768	357,562	357,354	357,145
0,199	0,201	0,202	0,203	0,205	0,206	0,208	0,209	0,210
358,579	358,378	358,176	357,973	357,768	357,562	357,354	357,145	356,935
85,429	85,228	85,026	84,823	84,618	84,412	84,204	83,995	83,785
85,528	85,328	85,127	84,924	84,720	84,515	84,308	84,100	83,890
2578,476	2577,853	2577,227	2576,598	2575,965	2575,329	2574,689	2574,046	2573,400

1.2.5 Celková délka výměníku L

Jak již bylo uvedeno výše, výsledná délka trubkového svazku L bude taková, kdy křivka klesající teplota v K2 z hodnoty t_{Wout} protne křivku rostoucí teploty v K1+CH z hodnoty t_{Win} v teplotě t_{WK2in} viz. Obr.1.9. na straně 29. Proto byla velikost L_{max} stanovena s dostatečnou rezervou, aby k protnutí obou křivek došlo v mezích $<0\text{m};10\text{m}>$.

Z výsledků K1+CH v kap.1.2.3 a K2 v kap.1.2.4 byla vytvořena tabulka, která obsahuje průběh teplot po délce trubkového svazku.

Tab.1.33. Průběh teplot oběhové vody pro K1+CH a K2 $L_{max} <0m;0,6m>$

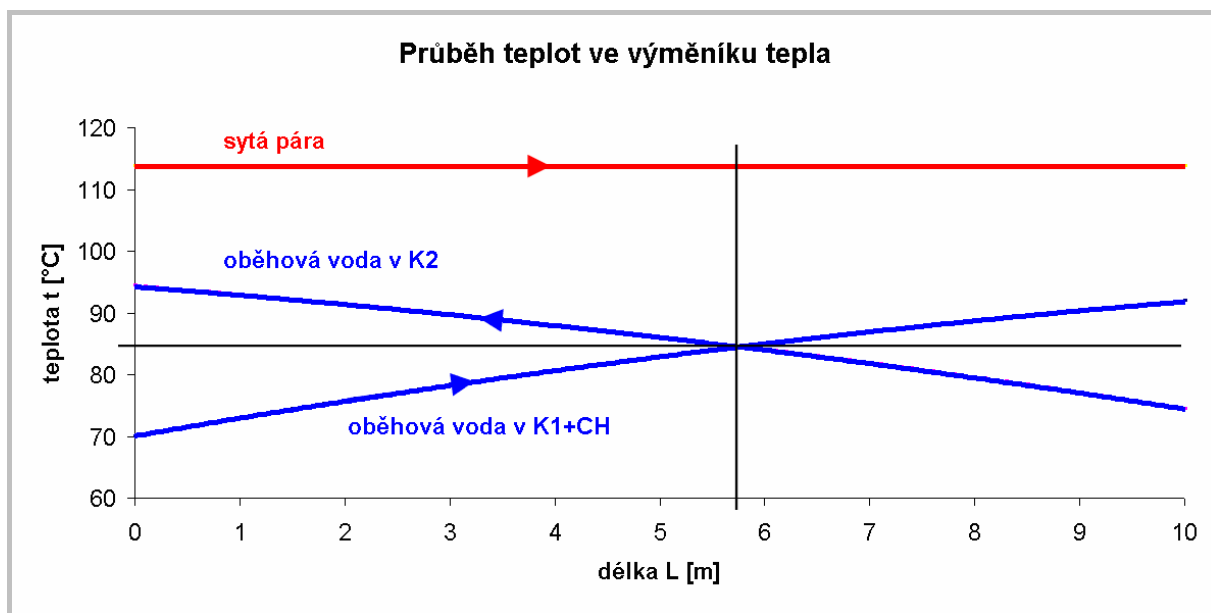
ΔL	[m]	0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
L	[m]	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
t_{WK1+CH}	[°C]	70	70,289	70,593	70,894	71,192	71,489	71,784
t_{WK2}	[°C]	94,3	94,161	94,021	93,880	93,738	93,595	93,451

Ostře sledovaný úsek $L_{max} <5,3m;6,1m>$.

Tab.1.34. Průběh teplot oběhové vody pro K1+CH a K2 $L_{max} <5,3m;6,1m>$

0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
5,3	5,4	5,5	5,6	5,7	5,8	5,9	6	6,1
83,522	83,731	83,939	84,146	84,351	84,554	84,756	84,956	85,156
85,429	85,228	85,026	84,823	84,618	84,412	84,204	83,995	83,785

Předpoklady se naplnily a teploty oběhové vody v obou cestách se k sobě významněji přiblížily v úseku $L_{max} <5,7m;5,8m>$. Byl sestrojen Graf.1.3. zobrazující průběh teplot v obou cestách výměníku tepla. Obě křivky se protnuly v bodě o hodnotě $L = 5,76m$ a $t = 84,49^{\circ}C$, který udává jednak konečnou délku trubkového svazku, ale i teplotu oběhové vody v obrátové komoře.



Graf.1.3. Průběh teplot obou médií ve výměníku tepla, svislá čára v průsečíku obou křivek protíná vodorovnou osu v hodnotě $L = 5,76m$ a tedy udává celkovou délku trubkového svazku. Vodorovná čára protíná svislou osu v hodnotě $t = 84,49^{\circ}C$ a udává teplotu oběhové vody v obrátové komoře.

V Tab.1.35. jsou uvedeny výsledné hodnoty délky trubkového svazku L pro všechny materiály teplosměnné plochy pro zanesený výměník.

Tab.1.35. Výsledné hodnoty L [m] pro všechny materiály

17 248.4	5,76	TiGr2	5,15
17 348.4	5,76	12 021.1	4,25
VLX 439	4,98	CuZn20Al2As	4,18

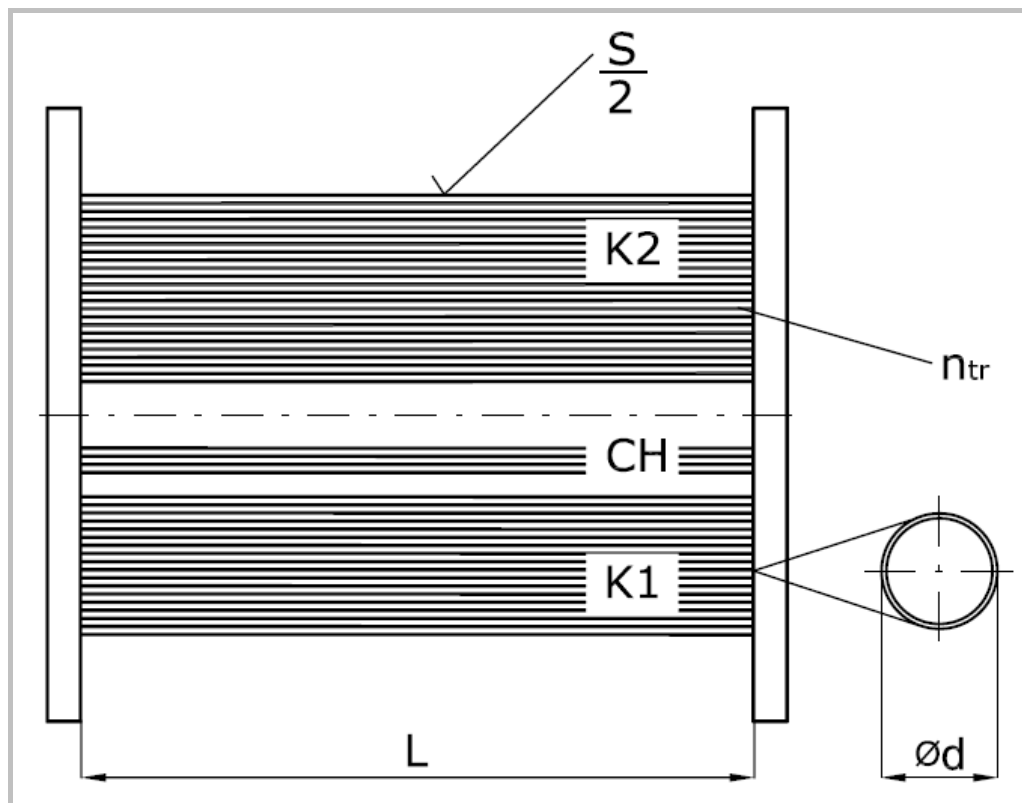
1.2.6 Celková velikost teplosměnné plochy S

Velikost teplosměnné plochy závisí na délce trubkového svazku L , průměru trubky d a počtu trubek ve svazku n_{tr} v obou cestách viz Obr.1.15.

$$S = 2 \cdot n_{tr} \cdot L \cdot \pi \cdot d = 2 \cdot 4283 \cdot 5,76[m] \cdot \pi \cdot \frac{20}{1000}[m] = 3100,134[m^2]$$

Tab.1.36. Výsledné hodnoty $S [m^2]$ pro všechny materiály teplosměnné plochy

17 248.4	3100,134	TiGr2	2725,872
17 348.4	3100,134	12 021.1	2834,848
VLX 439	2814,872	CuZn20Al2As	2648,433



Obr.1.15. Schéma teplosměnné plochy S dvojcestného výměníku s uvažováním chladiče parovzdušní směsi CH a zakreslení všech potřebných parametrů pro její výpočet

1.3 Závislost tepelného výkonu na hmotnostním průtoku topné vody

Dle zadání:

Pro vybrané materiály proveďte charakteristiky (závislost tepelného výkonu na hmotnostním průtoku topné vody) pro různé průtoky od 1500 t/hod do 8000 t/hod.

Řešení:

Pro jednotlivé hmotnostní toky oběhové vody od 1500 [t/hod] do 8000 [t/hod] s krokem 500 [t/hod] budou spočteny tepelné výkony a bude sestaven graf závislosti tepelného výkonu na hmotnostním průtoku oběhové vody pro všechny materiály teplosměnných ploch.

Výpočet pro 17 248.4:

Tab.1.39. Ukázkový výpočet

M [kg/s]	M
M / M_{\max}	$\frac{M}{M_{\max}}$
n_{trM}	$\frac{M}{M_{\max}} \cdot n_{tr}$
S_M [m ²]	$2 \cdot n_{trM} \cdot L \cdot d \cdot \pi$
Q [MW]	$\frac{k_Z \cdot S_M \cdot \Delta t_L}{1000\,000}$

kde:

M	jednotlivé hmotnostní průtoky	$M < 1500 \text{ t/hod}; 8000 \text{ t/hod} >$
M_{\max}	maximální průtok vody viz. zadání	$M_{\max} = 2222,222$ [kg/s]
n_{tr}	počet trubek v jedné cestě pro M_{\max}	$n_{tr} = 4283$
n_{trM}	počet trubek v jedné cestě pro M	n_{trM}
L	délka trubkového svazku	$L = 5,76$ [m]
d	vnější průměr trubky	$d = 0,02$ [m]
S_M	teplosměnná plocha zatížená M	S_M [m ²]
k_Z	průměrná hodnota součinitele prostupu tepla válcovou stěnou pro zanesený výměník	$k_Z = 2567,872$ [W/mK]
Δt_L	střední logaritmický teplotní spád	$\Delta t_L = 29,997$ [°C]
Q	přenášený tepelný výkon	Q [MW]

Výsledky výpočtu pro jednotlivé hmotnostní průtoky oběhové vody jsou uvedeny v následující tabulce:

Tab.1.40. Výsledky 17 248.4 výpočtu pro M <1500t/hod;5500 t/hod >

M[t/hod]	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	5500
M[kg/s]	416,667	555,556	694,444	833,333	972,222	1111,111	1250	1388,889	1527,778
M/M _{max}	0,186	0,250	0,313	0,375	0,438	0,500	0,563	0,625	0,688
n _{trM}	804	1071	1339	1607	1874	2142	2410	2677	2945
S _M [m ²]	581,934	775,214	969,199	1163,183	1356,444	1550,429	1744,413	1937,674	2131,659
Q [MW]	44,827	59,713	74,655	89,598	104,484	119,426	134,369	149,255	164,197

Tab.1.41. Výsledky 17 248.4 výpočtu pro M <6000t/hod;8000t/hod >

6000	6500	7000	7500	8000
1666,667	1805,556	1944,444	2083,333	2222,222
0,750	0,813	0,875	0,936	1
3213	3480	3748	4016	4283
2325,643	2518,904	2712,888	2906,873	3100,134
179,140	194,026	208,968	223,911	238,797

V následující tabulce jsou uvedeny výsledné tepelné výkony pro všechny materiály teplosměnné plochy.

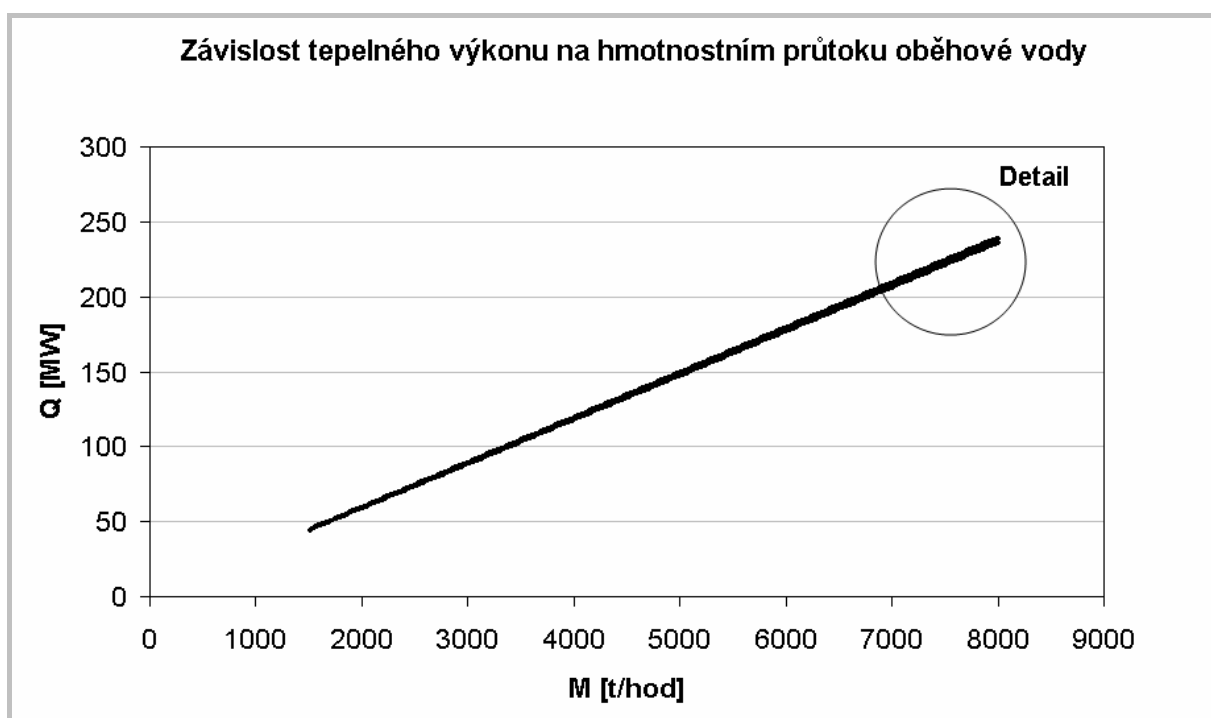
Tab.1.42. Výsledky Q [MW] výpočtu pro M <1500t/hod;5500 t/hod >

M[t/hod]	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	5500
17 248.4	44,827	59,713	74,655	89,598	104,484	119,426	134,369	149,255	164,197
17 348.4	44,827	59,713	74,655	89,598	104,484	119,426	134,369	149,255	164,197
VLX 439	44,661	59,531	74,400	89,270	104,139	119,009	133,931	148,800	163,670
TiGr2	44,956	59,922	74,945	89,911	104,878	119,844	134,867	149,833	164,800
CuZn20..	44,332	59,093	73,855	88,617	103,378	118,140	132,948	147,710	162,472
12 021.1	44,264	58,975	73,730	88,484	103,239	117,950	132,704	147,459	162,214

Tab.1.43. Výsledky Q [MW] výpočtu pro M <6000t/hod;8000t/hod >

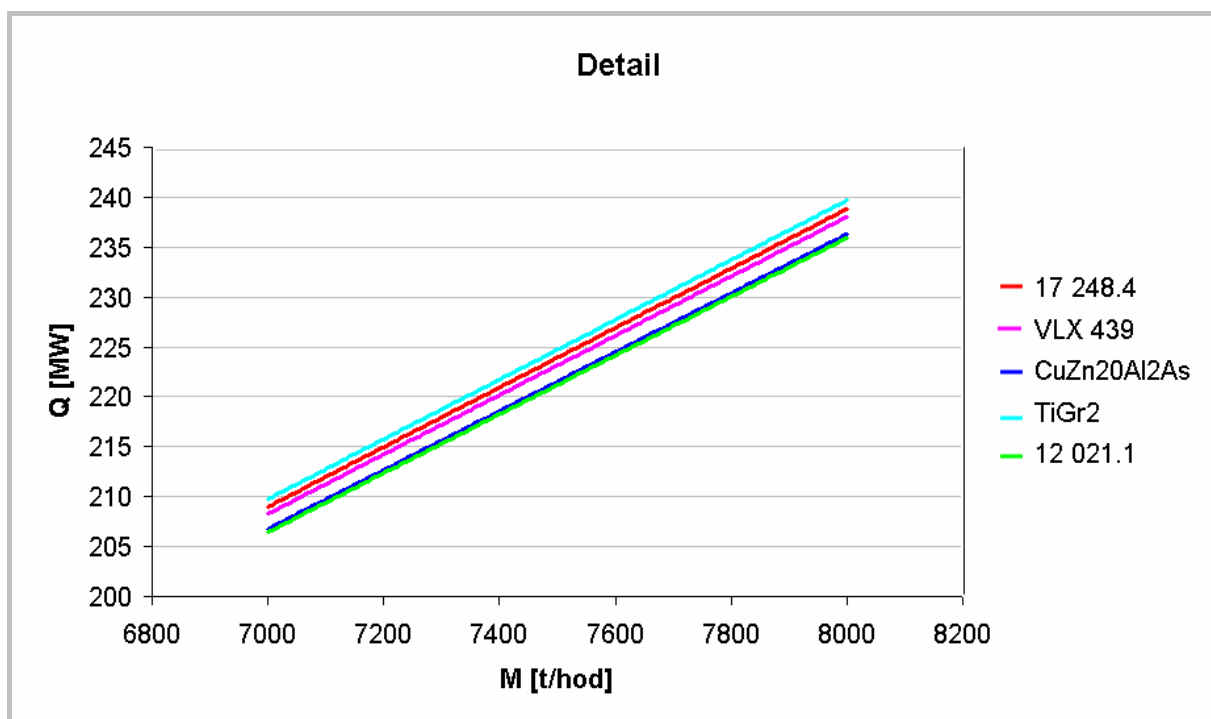
6000	6500	7000	7500	8000
179,140	194,026	208,968	223,911	238,797
179,140	194,026	208,968	223,911	238,797
178,539	193,409	208,278	223,148	238,017
179,766	194,789	209,755	224,722	239,688
177,233	191,995	206,756	221,518	236,280
176,924	191,679	206,434	221,189	235,899

Z výsledků z předchozích dvou tabulek byl sestaven graf, který popisuje závislost tepelného výkonu na hmotnostním průtoku oběhové vody pro všechny materiály teplosměnné plochy. Graf.1.4. je umístěn na další stránce.



Graf.1.4. Závislost tepelného výkonu na hmotnostním průtoku oběhové vody pro všechny materiály

Detailnější náhled na oblast průtoků $M < 7000 \text{ t/hod}; 8000 \text{ t/hod} >$ viz. Graf.1.5.



Graf.1.5. Závislost tep. výkonu na hmotnostním průtoku v detailnějším náhledu, materiál 17 348.4 má stejnou charakteristiku jako materiál 17 248.4, proto není zakreslen

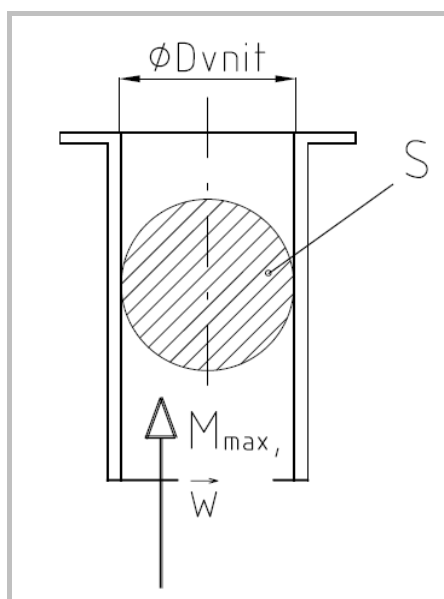
2 HYDRAULICKÝ VÝPOČET VÝMĚNÍKU

Předmětem řešení této kapitoly je navržení rozměrů vstupních / výstupních hrdel jak na straně oběhové topné vody, tak i na straně syté páry / kondenzátu. Dalším předmětem řešení této kapitoly je výpočet tlakových ztrát na straně oběhové topné vody pro výměník v nezaneseném (čistém) a zaneseném stavu.

2.1 Rozměry hrdel

2.1.1 Rozměry hrdel na straně oběhové topné vody

Na straně oběhové topné vody jsou umístěny dvě hrdla – vstupní a výstupní. Jelikož vlivem průchodu oběhové vody výměníkem tepla dochází pouze k jejímu ohřátí a ne ke změně její fáze a jelikož rozdíl teplot obou médií není nikterak velký, budou mít obě hrdla podobné rozměry. Ve výstupním hrdle má médium vyšší teplotu, než v hrdle vstupním. S rostoucí teplotou média klesá jeho hustota a při stejném hmotnostním průtoku a rychlosti proudění roste potřebný průtočný průřez S a tedy i vnitřní průměr hrdla D_{vnit} viz. Obr.2.1.



Obr.2.1. Schéma hrdla, průtočný průřez S , hmotnostní průtok M , rychlost proudění w

Výpočet je proveden pro výstupní hrdlo, výsledek vstupního hrdla bude uveden v závorce.

Potřebné parametry:

Hmotnostní průtok vody M : $M = M_{max} = 2222,222 \text{ [kg/s]}$

Rychlost proudění vody w_w : $w_w = 2,05 \text{ [m/s]}$

Hustota vody na výstupu z výměníku ρ_{wout} z tabulek[2] pro $t_{wout} = 94,3 [^{\circ}\text{C}]$ $P_w = 2 \text{ [MPa]}$

$$\Rightarrow \rho_{wout} = 963,255 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

Výpočet:

Nejdříve se vypočte průtočný průřez pro vodu S_W a z něj se vypočte vnitřní průměr hrdla D_{vnt} .

$$S_W = \frac{\dot{M}_W}{\rho_{Wout} \cdot w_W} = \frac{2222,222 [kg/s]}{963,26 [kg/m^3] \cdot 2,05 [m/s]} = 1,125 [m^2] \quad (1,018 [m^2])$$

$$D_{vnt} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_W}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1,125}{\pi}} = 1,197 [m] \quad (1,188 [m])$$

Podle výsledků výpočtu byl zvolen pro obě dvě hrdla rozměr **DN 1200**

2.1.2 Rozměry hrdel na straně syté páry / kondenzátu

Přívodním hrdlem, které je umístěno v horní části parního pláště, je do výměníku přivedena sytá pára. Ta kondenzuje na teplosměnné ploše, stéká po ní do spodní části výměníku a tam vytváří hladinu. Hrdlo na odvod kondenzátu z výměníku je umístěno ve spodní části parního pláště. Jelikož má sytá pára tisíckrát nižší hustotu než kondenzát, bude rozdíl v rozměrech vstupního a výstupního hrdla značně velký.

Přívodní hrdlo syté páry:Potřebné parametry:

Maximální přenášený tepelný výkon Q_{max} : $Q_{max} = 238 [MW]$ – určeno z výsledků v Tab.1.43.
pro maximální průtok
oběhové vody 8000 [t/hod]

Entalpie syté páry i'' : pro tlak $P_s = 0,1625 [MPa]$ byla z tabulek [2] stanovena hodnota

$$i'' = 2696,750 \left[\frac{kJ}{kg} \right] = 2696750 \left[\frac{J}{kg} \right]$$

Entalpie syté kapaliny (kondenzátu) i' : pro tlak $P_s = 0,1625 [MPa]$ byla z tabulek [2] stanovena hodnota

$$i' = 477,335 \left[\frac{kJ}{kg} \right] = 477335 \left[\frac{J}{kg} \right]$$

Hustota syté páry ρ'' : pro tlak $P_s = 0,1625 [MPa]$ byla z tabulek [2] stanovena interpolací hodnota

$$\rho'' = 0,930 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

Rychlost syté páry w_s : $w_s = 30 [m/s]$ – voleno

Výpočet:Hmotnostní průtok páry \dot{M}_S :

$$\dot{Q}_{\max} = \dot{M}_S \cdot (i'' - i') \Rightarrow \dot{M}_S = \frac{\dot{Q}_{\max}}{(i'' - i')} = \frac{238000 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}}{\left(2696,750 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] - 477,335 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] \right)} = 107,235 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$$

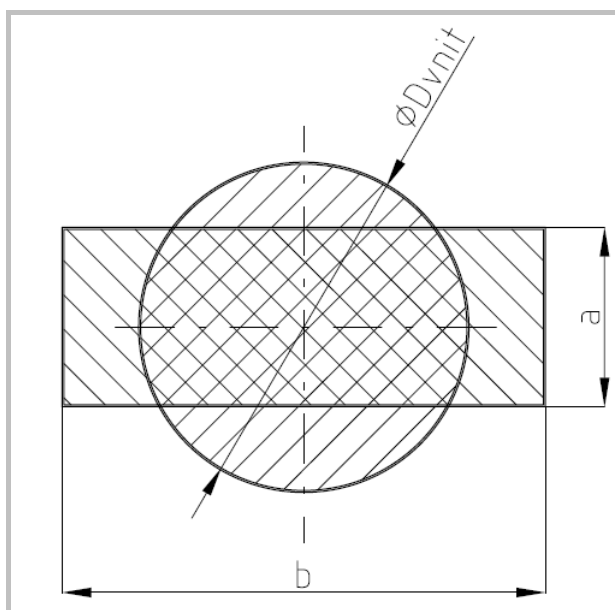
Průtočný průřez S_S :

$$S_S = \frac{\dot{M}_S}{\rho'' \cdot w_S} = \frac{107,235 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]}{0,930 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot 30 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]} = 3,844 \left[\text{m}^2 \right]$$

Vnitřní průměr D_{vnit} :

$$D_{\text{vnit}} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_S}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 3,844}{\pi}} = 2,212 \left[\text{m} \right]$$

Výsledná hodnota vnitřního průměru přívodního hrdla se zdála příliš velká v porovnání s rozměry výměníků, proto byla provedena transformace kruhového průřezu na obdélníkový viz. Obr.2.2. Podle délek trubkového svazku byly vytvořeny dvě varianty přívodních hrdel.



Obr.2.2. Změna kruhového průtočného průřezu na obdélníkový

Pro výměníky s krátkým trubkovým svazkem (12 021.1, CuZn20Al2As) byly dány rozměry přívodního hrdla $a \times b$, kde rozměr a byl pevně stanoven na $a = 1,8 \left[\text{m} \right]$ a rozměr b se dopočítal z:

$$b = \frac{S_S}{a} = \frac{3,844 \left[\text{m}^2 \right]}{1,8 \left[\text{m} \right]} = 2,135 \left[\text{m} \right]$$

Pro výměníky s dlouhým trubkovým svazkem (17 248.2, 17 348.2, VLX 439, TiGr2) byly dány rozměry přívodního hrdla $a \times b$, kde rozměr a byl pevně stanoven na $a = 1,2[m]$ a rozměr b se dopočítal z:

$$b = \frac{S_s}{a} = \frac{3,844[m^2]}{1,2[m]} = 3,200[m]$$

Rozměry výsledných přívodních hrdel $a \times b$ jsou **1,2m x 3,2m** a **1,8m x 2,135m**. Přívodní hrdla se v místě připojení k parnímu plášti výměníku jehlanovitě rozšiřují na rozměry $a \times b$ **1,8m x 3,7m** a **2,4 x 2,635m**. Dochází zde k příznivému snížení rychlosti proudění páry před vstupem nad trubkový svazek.

Hrdlo pro odvod kondenzátu:

Obdobný výpočet jako v kap.2.1.1., vstupní parametry:

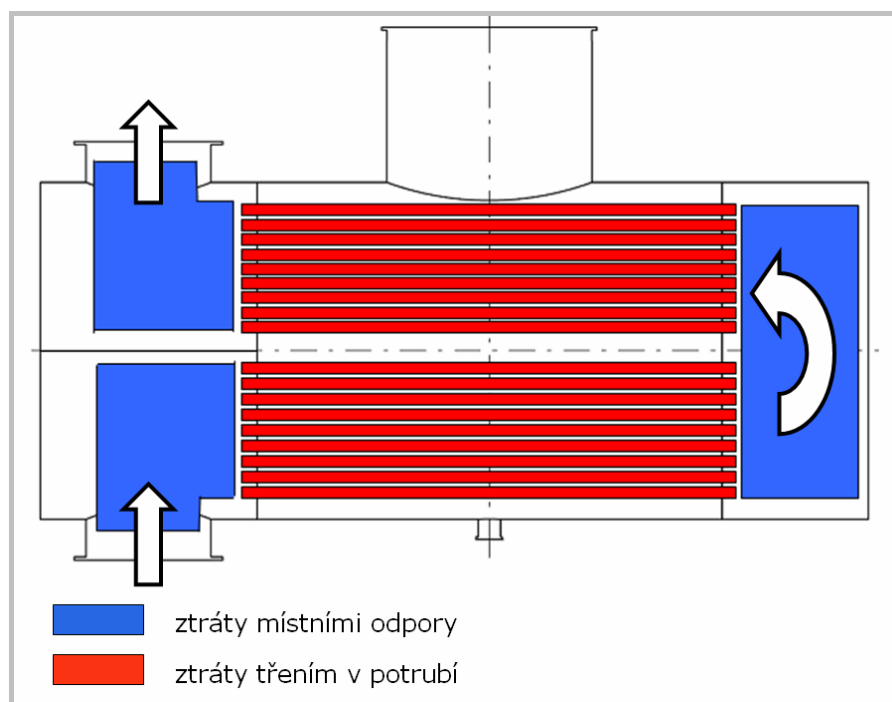
Rychlost proudění kondenzátu $w = 1,6 \text{ m/s}$; Hmotnostní průtok $M_s = 107,235 \text{ kg/s}$; Hustota kondenzátu $\rho' = 948,044 \text{ kg/m}^3$

Výsledek: $D = 0,3006 \text{ m}$

Zvoleno hrdlo kruhového průřezu: **DN 300**

2.2 Tlakové ztráty na straně oběhové topné vody

Celková tlaková ztráta na straně oběhové vody je suma ztrát skládající se ze ztrát třením v potrubí a ztrát místními odpory. Na Obr.2.3 jsou zakresleny jednotlivé složky tlakové ztráty na straně vody při průchodu výměníkem.



Obr.2.3 Schéma výměníku a zobrazení ztrát na straně oběhové topné vody

Výpočet bude detailně proveden pro materiál trubek 17 248.4, pro zbylé materiály budou výsledky uvedeny v tabulkách.

2.2.1 Čistý výměník

dle: [7]

2.2.1.1 Ztráty třením v potrubí

Teplota na vnitřní stěně trubky t_2 :

$$t_2 = \left\{ (273,15 + t_{wstr}) + \left[\left(\frac{k}{\alpha_w} \right) \cdot (t_s - t_{wstr}) \right] \right\} - 273,15 =$$

$$= \left\{ (273,15 + 82,15[^\circ\text{C}]) + \left[\left(\frac{2807,536 \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]}{12148,581 \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]} \right) \cdot (113,769[^\circ\text{C}] - 82,15[^\circ\text{C}]) \right] \right\} = 89,457[^\circ\text{C}]$$

Tab.2.1 Hodnoty t_2 pro ostatní varianty teplosměnných ploch [$^\circ\text{C}$]

17 248.4	89,457	TiGr2	90,872
17 348.4	89,457	12 021.1	90,599
VLX 439	90,485	CuZn20Al2As	90,833

Dynamická viskozita vody v mezní vrstvě u vnitřní stěny trubky η_m :

pro tlak $P_w = 2[\text{MPa}]$ a teplotu $t_2 = 89,457[^\circ\text{C}]$ byla z tabulek [2] stanovena interpolací hodnota

$$\eta_m = 322,751 \cdot 10^{-6} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}} \right]$$

Tab.2.2 Hodnoty η_m pro ostatní varianty teplosměnných ploch [kg/ms]

17 248.4	322,751 x 10^{-6}	TiGr2	317,319 x 10^{-6}
17 348.4	322,751 x 10^{-6}	12 021.1	318,368 x 10^{-6}
VLX 439	318,803 x 10^{-6}	CuZn20Al2As	317,466 x 10^{-6}

Dynamická viskozita vody ve středu proudu η_w :

pro tlak $P_w = 2[\text{MPa}]$ a teplotu $t_{wstr} = 82,150[^\circ\text{C}]$ byla z tabulek [2] stanovena interpolací hodnota

$$\eta_w = 350,811 \cdot 10^{-6} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}} \right]$$

Pro všechny varianty teplosměnných ploch je hodnota η_w stejná.

Proměnný exponent a :

Pro $\text{Re} > 2320$ a pro směr tepelného toku do trubkového svazku

$$a = 0,14$$

Pro všechny varianty teplosměnných ploch je hodnota a stejná.

Korekční faktor z_2 :

$$z_2 = \left(\frac{\eta_m}{\eta_w} \right)^a = \left(\frac{322,751 \cdot 10^{-6} \left[\frac{kg}{m \cdot s} \right]}{350,811 \cdot 10^{-6} \left[\frac{kg}{m \cdot s} \right]} \right)^{0,14} = 0,129$$

Tab.2.3 Hodnoty z_2 pro ostatní varianty teplosměnných ploch

17 248.4	0,129	TiGr2	0,127
17 348.4	0,129	12 021.1	0,127
VLX 439	0,127	CuZn20Al2As	0,127

Korekční faktor z_l :

Pro délky trubek viz. Tab.1.35.

$$z_l = \frac{L}{d_{int}} = \frac{5760[mm]}{18[mm]} = 320$$

Tab.2.4 Hodnoty z_l pro ostatní varianty teplosměnných ploch

17 248.4	320	TiGr2	276,882
17 348.4	320	12 021.1	250
VLX 439	276,667	CuZn20Al2As	245,882

Střední absolutní drsnost stěny trubky k_t :

$$k_t = 0,00002m$$

Pro všechny varianty teplosměnných ploch je hodnota k_t stejná.

Relativní drsnost stěny trubky $k_{r,l}$:

$$k_{r,l} = \frac{k_t}{d_{int}} = \frac{0,02[mm]}{18[mm]} = 0,001$$

Tab.2.5 Hodnoty $k_{r,l}$ pro ostatní varianty teplosměnných ploch

17 248.4	0,0011	TiGr2	0,0011
17 348.4	0,0011	12 021.1	0,0012
VLX 439	0,0011	CuZn20Al2As	0,0012

Substituční faktor X_{10} :

Pro hodnoty Re viz. Tab.1.9.

$$X_{10} = \left(\frac{37530}{Re} \right)^{16} = \left(\frac{37530}{104618,6} \right)^{16} = 7,522 \cdot 10^{-8}$$

Tab.2.6 Hodnoty X_{10} pro ostatní varianty teplosměnných ploch

17 248.4	$7,522 \times 10^{-8}$	TiGr2	$9,716 \times 10^{-8}$
17 348.4	$7,522 \times 10^{-8}$	12 021.1	$9,310 \times 10^{-7}$
VLX 439	$1,642 \times 10^{-7}$	CuZn20Al2As	$4,097 \times 10^{-7}$

Substituční faktor X_9 :

$$X_9 = \left\{ 2,457 \cdot \ln \left[\frac{1}{\left(\frac{7}{\text{Re}} \right)^{0,9} + 0,27 \cdot k_{r1}} \right] \right\}^{16} =$$

$$= \left\{ 2,457 \cdot \ln \left[\frac{1}{\left(\frac{7}{104618,600} \right)^{0,9} + 0,27 \cdot 0,0011} \right] \right\}^{16} = 2,439 \cdot 10^{20}$$

Tab.2.7 Hodnoty X_9 pro ostatní varianty teplosměnných ploch

17 248.4	2,439 x 10 ²⁰	TiGr2	2,512 x 10 ²⁰
17 348.4	2,439 x 10 ²⁰	12 021.1	2,022 x 10 ²⁰
VLX 439	2,356 x 10 ²⁰	CuZn20Al2As	2,099 x 10 ²⁰

Ztrátový součinitel λ_{11} :

Pro $\text{Re} > 2320$

$$\lambda_{11} = 8 \cdot \left[\left(\frac{8}{\text{Re}} \right)^{12} + \frac{1}{(X_9 + X_{10})^2} \right]^{\frac{1}{12}} = 8 \cdot \left[\left(\frac{8}{104618,600} \right)^{12} + \frac{1}{(2,439 \cdot 10^{20} + 7,522 \cdot 10^{-8})^2} \right]^{\frac{1}{12}} = 0,023$$

Tab.2.8 Hodnoty λ_{11} pro ostatní varianty teplosměnných ploch

17 248.4	0,023	TiGr2	0,023
17 348.4	0,023	12 021.1	0,023
VLX 439	0,023	CuZn20Al2As	0,023

Počet chodů n_{CH} :

$$n_{CH} = 2$$

Pro všechny varianty teplosměnných ploch je hodnota k_t stejná.

Tlaková ztráta třením v potrubí Δp_t :

$$\Delta p_t = \lambda_{11} \cdot \frac{\rho_{wstr} \cdot w_w^2}{2} \cdot n_{CH} \cdot z_1 \cdot z_2 = 0,023 \cdot \frac{970,934 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot 2,1^2 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]^2}{2} \cdot 2 \cdot 320 \cdot 0,129 =$$

$$= 3993,917 [\text{Pa}] = 3,994 [\text{kPa}]$$

Tab.2.9 Hodnoty Δp_t pro ostatní varianty teplosměnných ploch [kPa]

17 248.4	3,994	TiGr2	3,097
17 348.4	3,994	12 021.1	2,579
VLX 439	3,107	CuZn20Al2As	2,790

2.2.1.2 Ztráty místními odpory

Ztrátový součinitel pro vstup a výstup z trubek svazku ξ_{11} : $\xi_{11} = 0,7$

Hodnota ξ_{11} je pro všechny varianty teplosměnných ploch stejná.

Ztrátový součinitel ohybu proudu v komoře ξ_{12} : $\xi_{12} = 0,4$

Hodnota ξ_{12} je pro všechny varianty teplosměnných ploch stejná.

Tlaková ztráta místními odpory Δp_m :

$$\Delta p_m = \left[\xi_{11} \cdot n_{CH} + \xi_{12} \cdot (n_{CH} - 1) \right] \cdot \frac{\rho_{wstr} \cdot w_w^2}{2} = \left[0,7 \cdot 2 + 0,4 \cdot (2 - 1) \right] \cdot \frac{970,934 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \cdot 2,1^2 \left[\frac{m}{s} \right]^2}{2} =$$

$$= 3853,639 [Pa] = 3,854 [kPa]$$

Tab.2.10 Hodnoty Δp_m pro ostatní varianty teplosměnných ploch [kPa]

17 248.4	3,854	TiGr2	3,495
17 348.4	3,854	12 021.1	3,155
VLX 439	3,495	CuZn20Al2As	3,495

2.2.1.3 Celková ztráta

$$\Delta p_z = \Delta p_t + \Delta p_m = 3,994 [kPa] + 3,853 [kPa] = 7,848 [kPa]$$

Tab.2.11 Hodnoty Δp_z pro ostatní varianty teplosměnných ploch [kPa]

17 248.4	7,848	TiGr2	6,592
17 348.4	7,848	12 021.1	5,734
VLX 439	6,602	CuZn20Al2As	6,285

2.2.2 Zanesený výměník

dle: [7]

2.2.2.1 Ztráty třením v potrubí

Tloušťka vrstvy nánosů δ_Z : $\delta_Z = 0,0001m$

Hodnota δ_Z je pro všechny varianty teplosměnných ploch stejná.

Střední absolutní drsnost nánosů k_{iZ} : $k_{iZ} = 0,0003m$

Hodnota k_{iZ} je pro všechny varianty teplosměnných ploch stejná.

Průtočná plocha S_Z :

$$S_Z = \frac{\pi \cdot (d_{vit} - 2 \cdot \delta_Z)^2}{4} \cdot n_{tr} = \frac{\pi \cdot (0,018[m] - 2 \cdot 0,0001[m])^2}{4} \cdot 4283 = 1,066[m^2]$$

Tab.2.12 Hodnoty S_Z pro ostatní varianty teplosměnných ploch [m²]

17 248.4	1,066	TiGr2	1,119
17 348.4	1,066	12 021.1	1,178
VLX 439	1,119	CuZn20Al2As	1,119

Rychlost proudění v zaneseném potrubí w_{WZ} :

$$w_{WZ} = \frac{\dot{M}_{\max}}{S_Z \cdot \rho_{Wstr}} = \frac{2222,222 \left[\frac{kg}{s} \right]}{1,066[m^2] \cdot 970,934 \left[\frac{kg}{m^3} \right]} = 2,147 \left[\frac{m}{s} \right]$$

Tab.2.13 Hodnoty w_{WZ} pro ostatní varianty teplosměnných ploch [m/s]

17 248.4	2,147	TiGr2	2,044
17 348.4	2,147	12 021.1	1,945
VLX 439	2,045	CuZn20Al2As	2,048

Přepočet Re_Z dle kap.1.1.1.2 s použitím rychlosti proudění z Tab.2.13. a uvažováním tloušťky nánosu.

Tab.2.14 Hodnoty Re_Z pro ostatní varianty teplosměnných ploch

17 248.4	105792,953	TiGr2	104068,641
17 348.4	105792,953	12 021.1	90445,012
VLX 439	100736,153	CuZn20Al2As	95216,605

Přepočet α_{WZ} dle kap.1.1.1.2:

Tab.2.15 Hodnoty α_{WZ} pro ostatní varianty teplosměnných ploch [W/m²K]

17 248.4	12395,279	TiGr2	11991,085
17 348.4	12395,279	12 021.1	13133,093
VLX 439	12395,279	CuZn20Al2As	13133,093

Teplota vnitřní stěny nánosu t_{2Z} :

Viz. kap.2.2.1.1 a použití k_Z z Tab.1.18.:

Tab.2.16 Hodnoty t_{2Z} pro ostatní varianty teplosměnných ploch [°C]

17 248.4	88,700	TiGr2	89,880
17 348.4	88,700	12 021.1	88,829
VLX 439	89,341	CuZn20Al2As	89,311

Dynamická viskozita vody v mezní vrstvě u vnitřní stěny trubky η_{mZ} :

pro tlak $P_W = 2[\text{MPa}]$ a teplotu $t_{2Z} = 88,700[^\circ\text{C}]$ byla z tabulek [2] stanovena interpolací hodnota:

$$\eta_m = 325,657 \cdot 10^{-6} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}} \right]$$

Tab.2.17 Hodnoty η_{mZ} pro ostatní varianty teplosměnných ploch [kg/ms]

17 248.4	325,657 x 10⁻⁶	TiGr2	321,129 x 10 ⁻⁶
17 348.4	325,657 x 10 ⁻⁶	12 021.1	325,163 x 10 ⁻⁶
VLX 439	323,198 x 10 ⁻⁶	CuZn20Al2As	323,314 x 10 ⁻⁶

Proměnný exponent a :

Pro $Re > 2320$ a pro směr tepelného toku do trubkového svazku $a = 0,14$

Pro všechny varianty teplosměnných ploch je hodnota a stejná.

Korekční faktor z_{2Z} :

Výpočet dle kap.2.2.1.1:

Tab.2.18 Hodnoty z_{2Z} pro ostatní varianty teplosměnných ploch

17 248.4	0,130	TiGr2	0,128
17 348.4	0,130	12 021.1	0,130
VLX 439	0,129	CuZn20Al2As	0,129

Korekční faktor z_{1Z} :

Výpočet dle kap.2.2.1.1 s respektováním $d_{inZ} = d_{in} - 2 \cdot \delta_Z$

Tab.2.18 Hodnoty z_{1Z} pro ostatní varianty teplosměnných ploch

17 248.4	323,596	TiGr2	279,891
17 348.4	323,596	12 021.1	252,976
VLX 439	279,775	CuZn20Al2As	248,810

Střední absolutní drsnost vrstvy nánosů k_{tZ} : $k_{tZ} = 0,0003\text{m}$

Pro všechny varianty teplosměnných ploch je hodnota k_{tZ} stejná.

Relativní drsnost stěny trubky k_{r1Z} :

Výpočet dle kap.2.2.1.1 s respektováním $d_{inZ} = d_{in} - 2 \cdot \delta_Z$

Tab.2.19 Hodnoty k_{r1Z} pro ostatní varianty teplosměnných ploch

17 248.4	0,017	TiGr2	0,016
17 348.4	0,017	12 021.1	0,018
VLX 439	0,017	CuZn20Al2As	0,018

Substituční faktor X_{10Z} :

Výpočet dle kap.2.2.1.1, hodnoty Re viz.Tab.2.14.

Tab.2.20 Hodnoty X_{10Z} pro ostatní varianty teplosměnných ploch

17 248.4	6,291 x 10⁻⁸	TiGr2	8,184 x 10 ⁻⁸
17 348.4	6,291 x 10 ⁻⁸	12 021.1	7,725 x 10 ⁻⁷
VLX 439	1,378 x 10 ⁻⁷	CuZn20Al2As	3,394 x 10 ⁻⁷

Substituční faktor X_{9Z} :

Výpočet dle kap.2.2.1.1, použití hodnot z kap.2.2.2.1.

Tab.2.21 Hodnoty X_{9Z} pro ostatní varianty teplosměnných ploch

17 248.4	8,069 x 10¹⁷	TiGr2	8,859 x 10 ¹⁷
17 348.4	8,069 x 10 ¹⁷	12 021.1	6,718 x 10 ¹⁷
VLX 439	8,029 x 10 ¹⁷	CuZn20Al2As	6,754 x 10 ¹⁷

Ztrátový součinitel λ_{11Z} :

Výpočet dle kap.2.2.1.1, použití hodnot z kap.2.2.2.1.

Tab.2.22 Hodnoty λ_{11Z} pro ostatní varianty teplosměnných ploch

17 248.4	0,046	TiGr2	0,046
17 348.4	0,046	12 021.1	0,047
VLX 439	0,046	CuZn20Al2As	0,047

Tlaková ztráta třením v potrubí Δp_{tZ} :

Výpočet dle kap.2.2.1.1, použití hodnot z kap.2.2.2.1.

Tab.2.23 Hodnoty Δp_{tZ} pro ostatní varianty teplosměnných ploch [kPa]

17 248.4	8,701	TiGr2	6,643
17 348.4	8,701	12 021.1	5,702
VLX 439	6,774	CuZn20Al2As	6,176

2.2.2.2 Ztráty místními odpory

Tlaková ztráta místními odpory Δp_{mZ} :Výpočet dle kap.2.2.1.1, rychlost proudění w_{WZ} :**Tab.2.24** Hodnoty Δp_{mZ} pro ostatní varianty teplosměnných ploch [kPa]

17 248.4	4,030	TiGr2	3,649
17 348.4	4,030	12 021.1	3,306
VLX 439	3,654	CuZn20Al2As	3,664

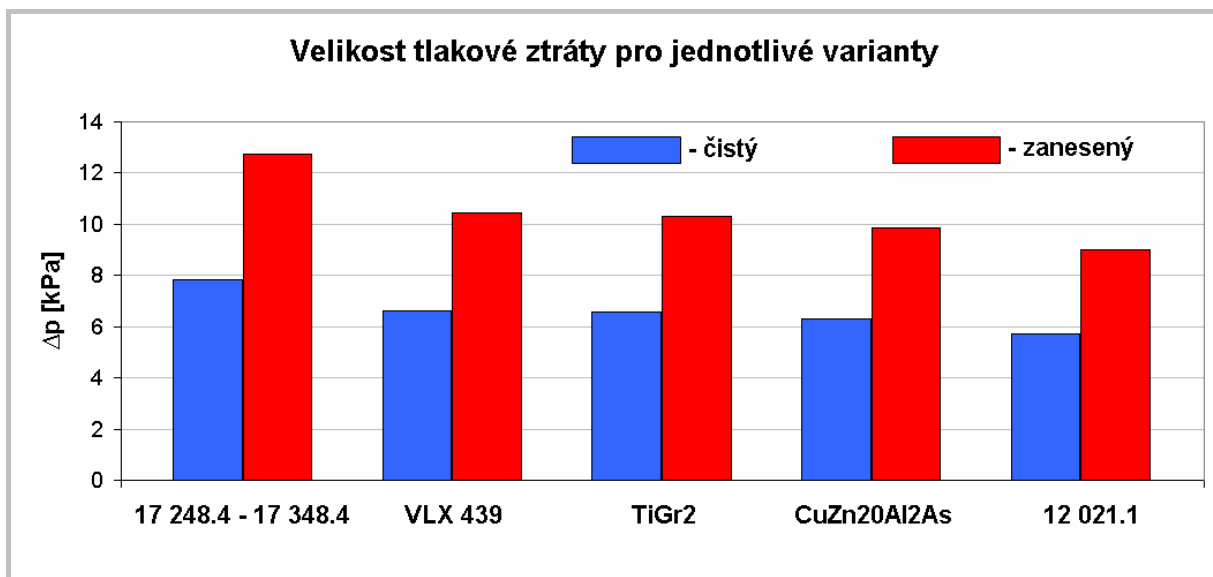
2.2.2.3 Celková ztráta

$$\Delta p_{zZ} = \Delta p_{tZ} + \Delta p_{mZ} = 8,701[kPa] + 4,030[kPa] = 12,731[kPa]$$

Tab.2.25 Hodnoty Δp_{zZ} pro ostatní varianty teplosměnných ploch [kPa]

17 248.4	12,731	TiGr2	10,292
17 348.4	12,731	12 021.1	9,008
VLX 439	10,427	CuZn20Al2As	9,840

Z výsledných hodnot celkové tlakové ztráty viz.Tab2.11. a Tab.2.25. ve výměníku tepla na straně topné oběhové vody pro čistý i zanesený výměník byl sestrojen Graf.2.1.



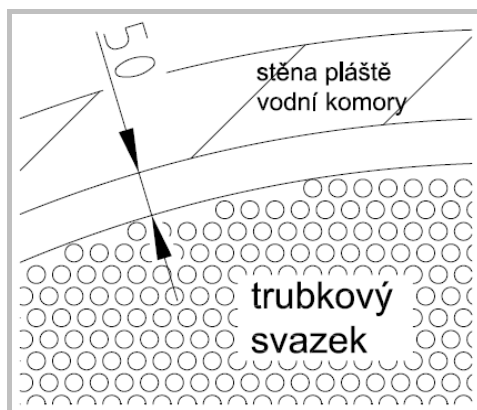
Graf.2.1. Velikost celkové tlakové ztráty na straně oběhové vody pro všechny materiály teplosměnné plochy

3 KONSTRUKČNÍ NÁVRH VÝMĚNÍKU

Před samotným pevnostním dimenzováním je nutné navrhnout předběžné rozměry jednotlivých komponent výměníku. Z tepelného výpočtu jsou známy rozměry trubkového svazku, z hydraulického výpočtu jsou to rozměry vstupních a výstupních hrdel pro obě média. Mimo požadavků zadání je nutné dále brát ohledy na:

Celosvařovaná konstrukce

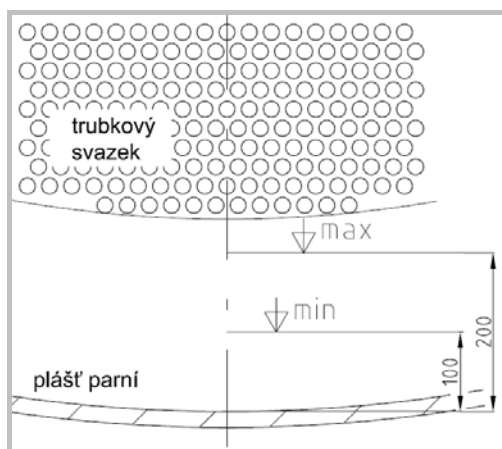
Z technologického hlediska svařování bylo nutné respektovat minimální mezeru mezi stěnou pláště a trubkovým svazkem pro dostupnost svařovací techniky, ta byla zvolena 50mm viz. Obr.3.1. Toto mělo vliv na volbu minimálního vnitřního průměru pláště vodní komory.



Obr.3.1 Mezera mezi pláštěm vodní komory a trubkovým svazkem

Výška hladiny kondenzátu

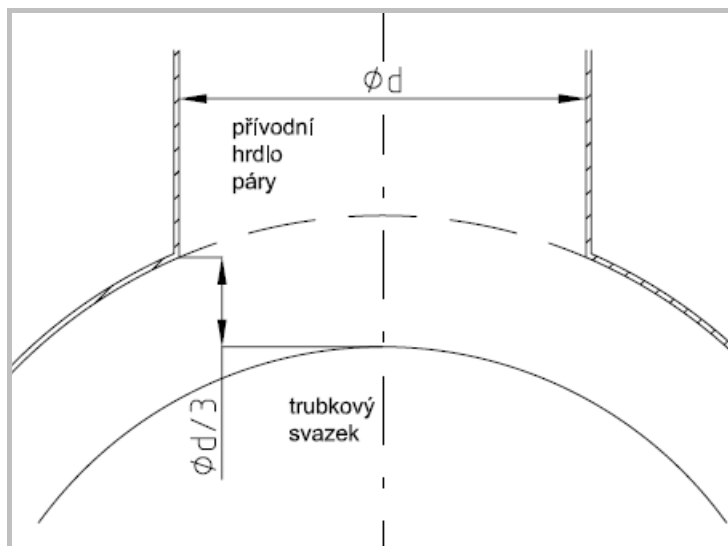
Ve spodní části parního pláště dochází k hromadění vzniklého kondenzátu. Maximální výška hladiny kondenzátu byla zvolena 200mm, minimální pak 100mm. Byla snaha zachovat mezeru mezi hladinou kondenzátu a nejnižší trubkou v trubkovém svazku, aby nedocházelo k ponoření trubek pod hladinu viz. Obr.3.2. Toto mělo vliv na minimální vnitřní průměr parního pláště a také na vzájemnou polohu horizontálních os trubkového svazku a parního pláště.



Obr.3.2 Výška hladiny kondenzátu

Vstupní prostor páry:

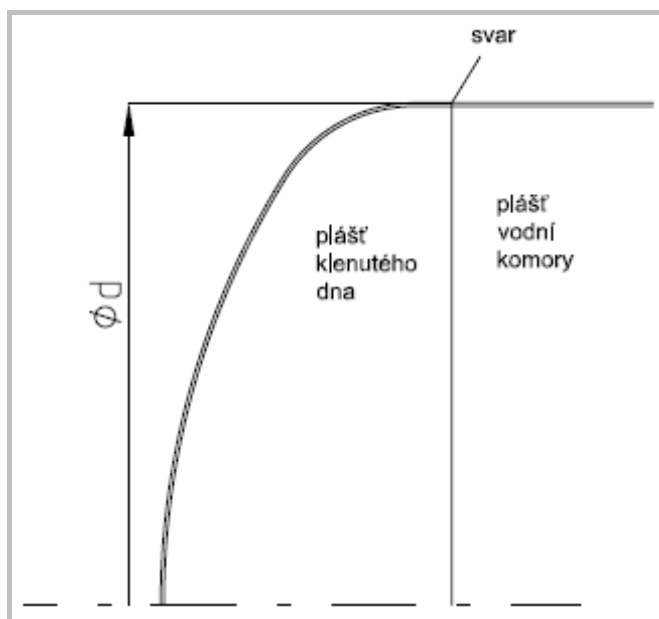
V horní části parního pláště je umístěno přívodní hrdlo páry viz. Obr.3.3. Kdyby bylo hrdlo příliš blízko u trubkového svazku, nedošlo by k rovnoměrnému rozprostření páry nad horními trubkami po celé délce trubkového svazku, také by došlo k nárůstu rychlosti proudění páry v mezitrubkovém prostoru horní řady trubek. Proto byla zvolena mezera mezi trubkovým svazkem a patou hrdla odpovídající hodnotě $1/3$ průměru hrdla d . Toto mělo vliv na volbu minimálního vnitřního průměru parního pláště.



Obr.3.3 Vstupní prostor páry

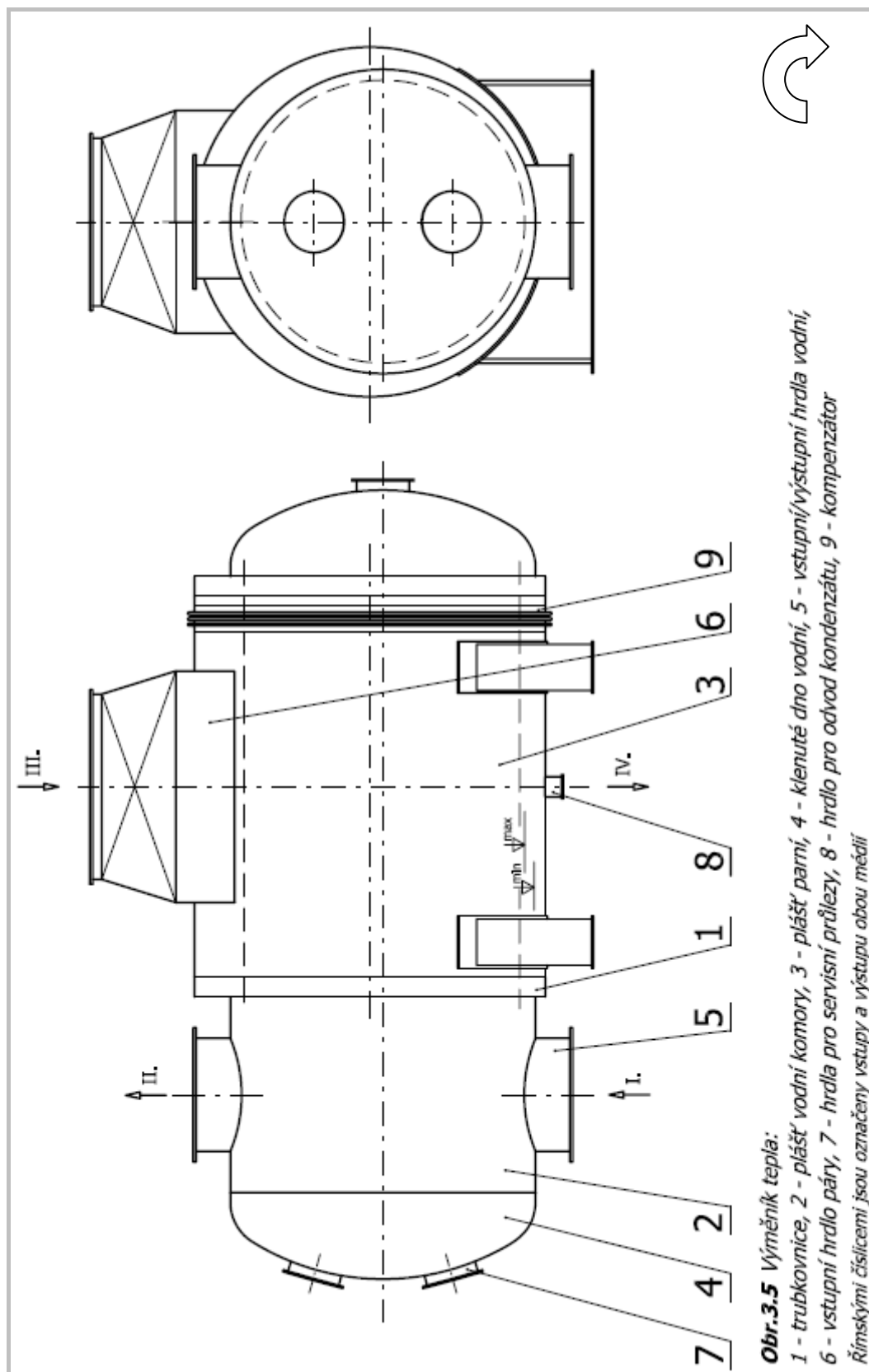
Rozměry dodávaných klenutých den:

Je snaha, aby vnější průměr pláště vodní komory měl stejný průměr jako k němu přivařené klenuté dno. Také je potřeba respektovat rozměry klenutých den udávaných jejich výrobcem. V tomto případě byly parametry klenutého dna brány dle: DIN 28 013. Toto mělo vliv na volbu maximálního vnějšího průměru pláště vodní komory.



Obr.3.4 Přivařené klenuté dno na plášť vodní komory

S respektováním výše uvedených konstrukčních požadavků byl sestrojen předběžný návrh rozměrů jednotlivých komponent výměníku, které poslouží jako vstupní parametry k jejich pevnostnímu dimenzování. Na Obr.3.5. je předběžný návrh celého výměníku a jsou zde zakresleny jeho jednotlivé komponenty.



4 PEVNOSTNÍ VÝPOČET VÝMĚNÍKU

Zadání pevnostního výpočtu:

Základní výměník navrhnete jako horizontální, dělený, dvoucestný na straně topné vody a celosvařovaného provedení. Součástí ZV musí být integrovaný chladič parovzdušné směsi. Výměník bude umístěn pod turbínou a v přechodovém parním potrubí bude umístěn kompenzátor.

Tlaky a teploty pro pevnostní dimenzování:

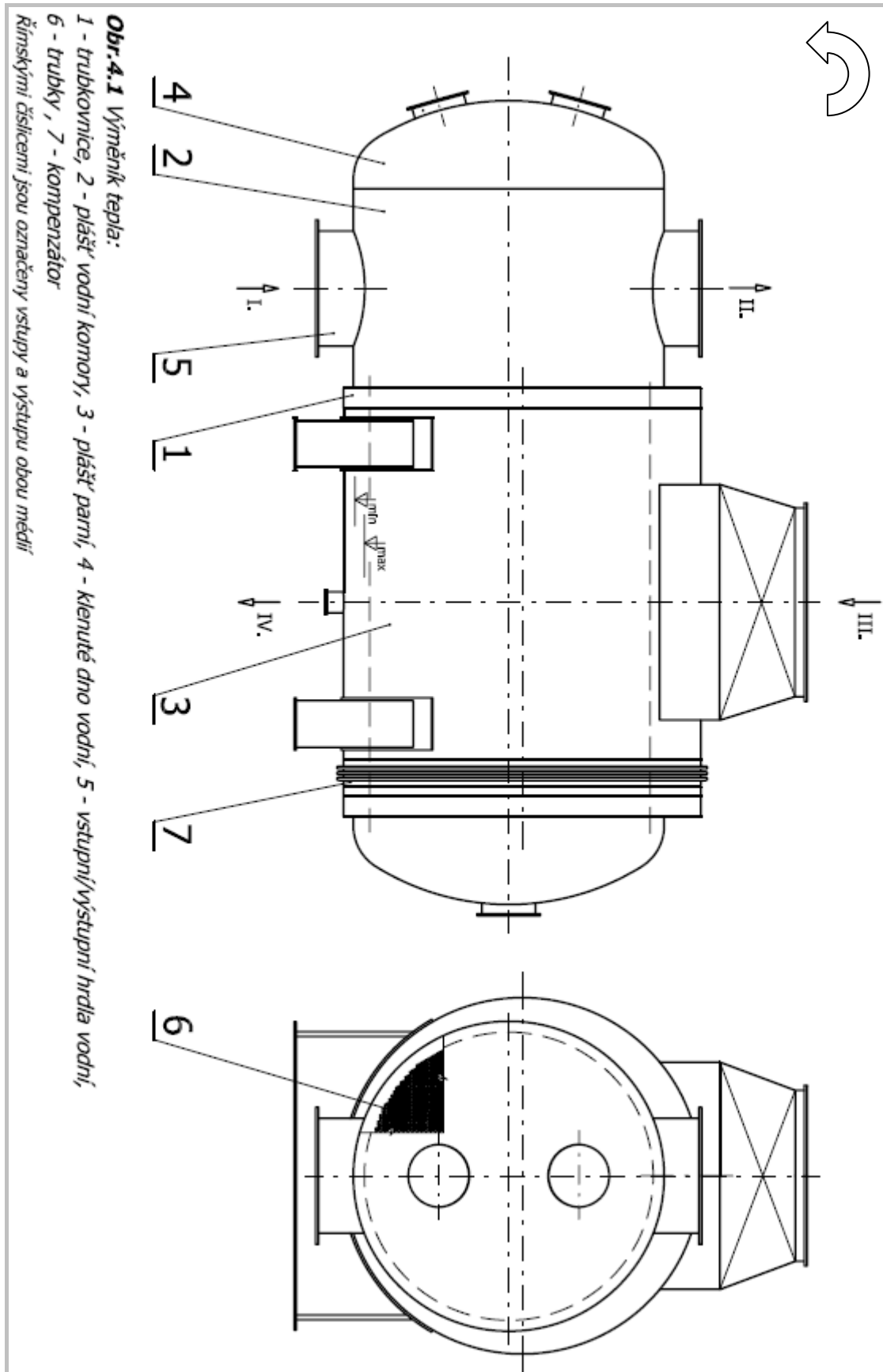
Prostor trubkového svazku (vodní prostor)	$p_t = 25 \text{ bar (g)},$	$t_t = 150 \text{ °C}$
Prostor pláště (parní prostor)	$p_s = (-1 \div 4) \text{ bar (g)},$	$t_s = 200 \text{ °C}$

Pevnostní dimenzování bude provedeno pouze pro provozní zatížení, zatížení při tlakové zkoušce nebude uvažováno.

Norma pro pevnostní dimenzování: dle **ČSN EN 13445 – 3**

Cílem pevnostního výpočtu je navrhnout takové tloušťky stěn a tedy i konečné rozměry jednotlivých komponent, aby při provozu výměníku nedošlo k jejich poškození vlivem působení pracovního média.

Na Obr.4.1. na další stránce jsou zakresleny jednotlivé komponenty výměníku tepla, které byly podrobeny pevnostnímu dimenzování. Není zde ale zakresleno přívodní hrdlo pro páru, protože nebylo podrobeno pevnostnímu dimenzování a to z důvodu složitosti výpočtu. Toto mělo vliv i na pevnostní dimenzování parního pláště, který byl počítán pouze jako válcová skořepina bez otvorů.



Pevnostní výpočet bude proveden postupně pro všechny vyznačené komponenty.

4.1 Trubkovnice

dle: **ČSN EN 13445 – 3 – příloha J**

Zatěžující tlak na straně vody: $P_T = 25\text{bar} = 2,5\text{MPa}$

Zatěžující tlak na straně páry: $P_{S1} = 4\text{bar} = 0,4\text{MPa}$
 $P_{S2} = -1\text{bar} = -0,1\text{MPa}$

Celý výpočet byl detailně spočítán pro materiál 17 248.4. Pro ostatní materiály budou hodnoty jednotlivých výsledků uvedeny v tabulce pod každým vzorcem.

Zatěžující stavy – kombinace působení jednotlivých tlaků od pracovních médií na trubkovnici jsou uvedeny v následující tabulce Tab.4.1. První řádek popisuje stav, kdy na trubkovnici působí pouze médium v trubkách. Druhý řádek představuje stav, kdy na trubkovnici působí pouze médium obtékající trubkový svazek. Třetí řádek představuje stav, kdy na trubkovnici působí obě média.

Tab.4.1. Kombinace zatěžování trubkovnice

P_T	P_T
P_{S1}	P_{S2}
P_T, P_{S1}	P_T, P_{S2}

4.1.1 Vlastnosti materiálů, volba základních rozměrů komponent

4.1.1.1 Materiál trubkovnice: P295GH EN 10028 – 2 (výp. teplota $t_S = 200^\circ\text{C}$)

Minimální hodnota meze kluzu 0,2% $R_{p0,2}$ pro teplotu $t_S = 200^\circ\text{C}$ a tloušťku výrobku $150 < t \leq 250\text{mm}$ z tabulek:

$$R_{p0,2} = 170 \text{ MPa}$$

Hodnoty $R_{p0,2}$ trubkovnice jsou pro ostatní varianty výměníku stejné.

Mez kluzu R_{eH} pro tloušťku výrobku $150 < t \leq 250\text{mm}$ z tabulek: $R_{eH} = 220 \text{ MPa}$

Hodnoty R_{eH} trubkovnice jsou pro ostatní varianty výměníku stejné.

Mez pevnosti v tahu R_m pro tloušťku výrobku $150 < t \leq 250\text{mm}$ z tabulek: $R_m = 430 \text{ MPa}$

Hodnoty R_m trubkovnice jsou pro ostatní varianty výměníku stejné.

Modul pružnosti E pro teplotu $t_S = 200^\circ\text{C}$ z tabulek: $E = 191000 \text{ MPa}$

Hodnoty E trubkovnice jsou pro ostatní varianty výměníku stejné.

Modul pružnosti E_{20} pro teplotu $t = 20^\circ\text{C}$ z tabulek: $E_{20} = 206000 \text{ MPa}$

Hodnoty E_{20} trubkovnice jsou pro ostatní varianty výměníku stejné.

Poissonova konstanta pro trubkovnici ν_p : $\nu_p = 0,3$

Hodnoty ν_p trubkovnice jsou pro ostatní varianty výměníku stejné.

Úbytek koroze trubkovnice c : $c = 1\text{ mm}$

Hodnoty c trubkovnice jsou pro ostatní varianty výměníku stejné.

Tloušťka trubkovnice e_F : $e_F = 264\text{ mm}$

Tab.4.2. Hodnoty e_F pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	264	TiGr2	275
17 348.4	264	CuZn20Al2As	261
VLX 439	261	12 021.1	260

V Tab.4.2. jsou uvedeny výsledné minimální tloušťky trubkovnice, ty však nespadají do rozmezí tloušťky $150 < t \leq 250\text{ mm}$ dle mě přístupné normy EN 10028 – 2. Bylo rozhodnuto pokračovat ve výpočtu trubkovnice s použitím pevnostních vlastností polotovaru o tloušťce v rozmezí $150 < t \leq 250\text{ mm}$ avšak s jejich lehkou korekcí (snížení) vlivem vyšší tloušťky.

Minimální hodnota meze kluzu 0,2% $R_{p0,2}$: $R_{p0,2} = 162\text{ MPa}$

Hodnoty $R_{p0,2}$ trubkovnice jsou pro ostatní varianty výměníku stejné.

Mez kluzu R_{eH} : $R_{eH} = 210\text{ MPa}$

Hodnoty R_{eH} trubkovnice jsou pro ostatní varianty výměníku stejné.

Mez pevnosti v tahu R_m : $R_m = 420\text{ MPa}$

Hodnoty R_m trubkovnice jsou pro ostatní varianty výměníku stejné.

Analýzovaná tloušťka trubkovnice e_p : $e_p = e_F - 2 \cdot c = 264[\text{mm}] - 2 \cdot 1[\text{mm}] = 262[\text{mm}]$

Tab.4.3. Hodnoty e_p pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	262	TiGr2	273
17 348.4	262	CuZn20Al2As	259
VLX 439	251	12 021.1	258

Dovolené namáhání pro trubkovnici f_p :

$$f_p = \text{menší } z \left(\frac{R_{p0,2}}{1,5} < \frac{R_m}{2,4} \right) = \text{menší } z \left(\frac{162[\text{MPa}]}{1,5} < \frac{420[\text{MPa}]}{2,4} \right) = 108[\text{MPa}]$$

Hodnoty f_p trubkovnice jsou pro ostatní varianty výměníku stejné.

Dovolené namáhání otrubkované oblasti trubkovnice f_A :

$$f_A = \text{menší } z \left(\frac{R_{eH}}{1,5} < \frac{R_m}{2,4} \right) = \text{menší } z \left(\frac{210[\text{MPa}]}{1,5} < \frac{420[\text{MPa}]}{2,4} \right) = 140[\text{MPa}]$$

Hodnoty f_A trubkovnice jsou pro ostatní varianty výměníku stejné.

4.1.1.2 Materiál trubek: 17 248.4 ČSN 41 7248 (výp. teplota $t_T = 150^\circ\text{C}$)Minimální hodnota meze kluzu 1,0% $R_{p1,0}$: z tabulek pro tloušťku do 10mm

$$R_{p1,0} = 245\text{MPa}$$

Tab.4.4. Hodnoty $R_{p1,0}$ pro všechny materiály trubek podle jednotlivých norem [MPa]

17 248.4	CSN 41 7248	245	TiGr2	DIN 17 861	270
17 348.4	CSN 41 7348	265	CuZn20Al2As	AD – Merkblatt W6/2	130
VLX 439	UNS S43035	270	12 021.1	CSN 41 2021	235

Mez pevnosti v tahu R_m pro tloušťku výrobku do 10mm z tabulek: $R_m = 500\text{ MPa}$ **Tab.4.5.** Hodnoty R_m pro všechny materiály trubek podle jednotlivých norem [MPa]

17 248.4	CSN 41 7248	500	TiGr2	DIN 17 861	390
17 348.4	CSN 41 7348	500	CuZn20Al2As	AD – Merkblatt W6/2	340
VLX 439	UNS S43035	450	12 021.1	CSN 41 2021	340

Minimální hodnota meze kluzu 1,0% $R_{p1,0t}$ pro teplotu $t_T = 150^\circ\text{C}$ z tabulek pro průměr tyčí do 100mm:

$$R_{p1,0t} = 195\text{ MPa}$$

Tab.4.6. Hodnoty $R_{p1,0t}$ pro všechny materiály trubek podle jednotlivých norem [MPa]

17 248.4	CSN 41 7248	195	TiGr2	DIN 17 861	195
17 348.4	CSN 41 7348	205	CuZn20Al2As	AD – Merkblatt W6/2	125
VLX 439	UNS S43035	215	12 021.1	CSN 41 2021	192

Minimální hodnota meze kluzu 0,2% $R_{p0,2t}$ pro teplotu $t_T = 150^\circ\text{C}$

$$R_{p0,2t} = 165\text{ MPa}$$

Tab.4.7. Hodnoty $R_{p0,2t}$ pro všechny materiály trubek podle jednotlivých norem [MPa]

17 248.4	CSN 41 7248	165	TiGr2	DIN 17 861	250
17 348.4	CSN 41 7348	176	CuZn20Al2As	AD – Merkblatt W6/2	120
VLX 439	UNS S43035	243	12 021.1	CSN 41 2021	163

Modul pružnosti E pro teplotu $t_T = 150^\circ\text{C}$ z tabulek: $E = 190000\text{ MPa}$ **Tab.4.8.** Hodnoty E pro všechny materiály trubek podle jednotlivých norem [MPa]

17 248.4	CSN 41 7248	190 000	TiGr2	DIN 17 861	103 000
17 348.4	CSN 41 7348	190 000	CuZn20Al2As	AD – Merkblatt W6/2	107 000
VLX 439	UNS S43035	192 500	12 021.1	CSN 41 2021	195 000

Průměr otvoru pro trubku d_0 : $d_0 = 20,4\text{mm}$

Hodnoty d_0 jsou pro ostatní varianty výměníku stejné.

Rozteč trubek p : $p = 28\text{mm}$

Hodnoty p jsou pro ostatní varianty výměníku stejné.

Délka zaválcování trubky v trubkovnici l_X : $l_X = 262\text{ mm}$

Tab.4.9. Hodnoty l_X pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	262	TiGr2	273
17 348.4	262	CuZn20Al2As	259
VLX 439	259	12 021.1	258

Vnější průměr trubky d_T : $d_T = 20\text{ mm}$

Hodnoty d_T trubek jsou pro ostatní varianty výměníku stejné.

Tloušťka stěny trubky e_T : $e_T = 1\text{ mm}$

Tab.4.10. Hodnoty e_T pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	1	TiGr2	0,7
17 348.4	1	CuZn20Al2As	1,5
VLX 439	1	12 021.1	1,5

Počet trubek v trubkovnici N_T : $N_T = 8566$

Tab.4.11. Hodnoty N_T pro všechny varianty výměníku

17 248.4	8566	TiGr2	8424
17 348.4	8566	CuZn20Al2As	10084
VLX 439	8996	12 021.1	10616

Vnitřní průměr trubky d_{Tvnit} : $d_{Tvnit} = d_T - 2 \cdot e_T = 20[\text{mm}] - 2 \cdot 1[\text{mm}] = 18[\text{mm}]$

Tab.4.12. Hodnoty d_{Tvnit} pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	18	TiGr2	18,6
17 348.4	18	CuZn20Al2As	17
VLX 439	18	12 021.1	17

Dovolené namáhání pro trubky f_T :

$$f_T = \left(\frac{R_{p1,0t}}{1,5} \right) = \left(\frac{195[\text{MPa}]}{1,5} \right) = 130[\text{MPa}]$$

Tab.4.13. Hodnoty f_T pro všechny varianty výměníku [MPa]

17 248.4	130	TiGr2	130
17 348.4	136,667	CuZn20Al2As	83,333
VLX 439	143,333	12 021.1	128

4.1.1.3 Materiál parního pláště: P265GH EN 10028 – 2 (výp. teplota $t_S = 200^\circ\text{C}$)

Mez kluzu R_{eHS} pro tloušťku výrobku $t \leq 16$ mm z tabulek: $R_{eHS} = 265$ MPa

Hodnoty R_{eHS} parního pláště jsou pro ostatní varianty výměníku stejné.

Minimální hodnota meze kluzu $0,2\%$ $R_{p0,2tS}$ pro teplotu $t_S = 200^\circ\text{C}$ a tloušťku výrobku $t \leq 16$ mm z tabulek:

$$R_{p0,2tS} = 205 \text{ MPa}$$

Hodnoty $R_{p0,2tS}$ parního pláště jsou pro ostatní varianty výměníku stejné.

Mez pevnosti v tahu R_{mS} pro tloušťku výrobku $t \leq 16$ mm z tabulek: $R_{mS} = 410$ MPa

Hodnoty R_{mS} parního pláště jsou pro ostatní varianty výměníku stejné.

Modul pružnosti E_S pro teplotu $t_S = 200^\circ\text{C}$ z tabulek: $E_S = 191000$ MPa

Hodnoty E_S parního pláště jsou pro ostatní varianty výměníku stejné.

Průměrná tloušťka pláště e_{Sav} : $e_{Sav} = 16$ mm

Hodnoty e_{Sav} parního pláště jsou pro ostatní varianty výměníku stejné.

Poissonova konstanta pro plášť ν_S : $\nu_S = 0,3$

Hodnoty ν_S parního pláště jsou pro ostatní varianty výměníku stejné.

Vnější průměr pláště D_{exS} : $D_{exS} = 3600$ mm

Tab.4.14. Hodnoty D_{exS} pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	3600	TiGr2	3400
17 348.4	3600	CuZn20Al2As	3800
VLX 439	3600	12 021.1	3800

Úbytek koroze pláště c_S : $c_S = 1$ mm

Hodnoty c_S parního pláště jsou pro ostatní varianty výměníku stejné.

Dolní úchylka tloušťky δ_S : $\delta_S = 0,6$ mm

Hodnoty δ_S parního pláště jsou pro ostatní varianty výměníku stejné.

Analyzovaná tloušťka pláště e_s : $e_s = e_{sav} - c_s - \delta_s = 16[mm] - 1[mm] - 0,6[mm] = 14,4[mm]$

Hodnoty e_s parního pláště jsou pro ostatní varianty výměníku stejné.

Vnitřní průměr pláště D_{vnitS} : $D_{vnitS} = D_{exS} - 2 \cdot e_s = 3600[mm] - 2 \cdot 14,4[mm] = 3571,2[mm]$

Tab.4.15. Hodnoty D_{vnitS} pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	3571,2	TiGr2	3371,2
17 348.4	3571,2	CuZn20Al2As	3771,2
VLX 439	3571,2	12 021.1	3771,2

Vnitřní průměr pláště bez přídatku na korozi D_s :

$$D_s = D_{vnitS} + 2 \cdot c_s = 3571,2[mm] + 2 \cdot 1[mm] = 3573,2[mm]$$

Tab.4.16. Hodnoty D_s pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	3573,2	TiGr2	3373,2
17 348.4	3573,2	CuZn20Al2As	3773,2
VLX 439	3573,2	12 021.1	3773,2

Dovolená namáhání pláště f_s :

$$f_s = \text{menší } z \left(\frac{R_{p0,2S}}{1,5} < \frac{R_{mS}}{2,4} \right) = \text{menší } z \left(\frac{205[MPa]}{1,5} < \frac{410[MPa]}{2,4} \right) = 136,667[MPa]$$

Hodnoty f_s parního pláště jsou pro ostatní varianty výměníku stejné.

4.1.1.4 Materiál pláště vodní komory: P265GH EN 10028 – 2 (výp. teplota $t_T = 150^\circ\text{C}$)

Mez kluzu R_{eHC} pro tloušťku výrobku $16 < t \leq 40$ mm z tabulek: $R_{eHC} = 255$ MPa

Hodnoty R_{eHC} pláště vodní komory jsou pro ostatní varianty výměníku stejné.

Mez pevnosti v tahu R_{mC} pro tloušťku výrobku $16 < t \leq 40$ mm z tabulek: $R_{mC} = 410$ MPa

Hodnoty R_{mC} pláště vodní komory jsou pro ostatní varianty výměníku stejné.

Minimální hodnota meze kluzu 0,2% $R_{p0,2tC}$ pro teplotu $t_T = 150^\circ\text{C}$ a tloušťku výrobku $16 < t \leq 40$ mm z tabulek:

$$R_{p0,2tC} = 215 \text{ MPa}$$

Hodnoty $R_{p0,2tC}$ pláště vodní komory jsou pro ostatní varianty výměníku stejné.

Průměrná tloušťka stěny pláště komory e_C : $e_C = 34$ mm

Tab.4.17. Hodnoty e_C pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	34	TiGr2	34
17 348.4	34	CuZn20Al2As	36
VLX 439	34	12 021.1	37

Dolní úchylka tloušťky δ_C : $\delta_C = 0,8 \text{ mm}$

Hodnoty δ_C pláště vodní komory jsou pro ostatní varianty výměníku stejné.

Vnější průměr pláště D_{exC} : $D_{exC} = 3100 \text{ mm}$

Tab.4.18. Hodnoty D_{exC} pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	3100	TiGr2	3000
17 348.4	3100	CuZn20Al2As	3300
VLX 439	3100	12 021.1	3400

Úbytek koroze pláště c_C : $c_C = 1 \text{ mm}$

Hodnoty c_C pláště vodní komory jsou pro ostatní varianty výměníku stejné.

Analýzovaná tloušťka pláště e_C : $e_C = e_{Cav} - c_C - \delta_C = 34[mm] - 1[mm] - 0,8[mm] = 32,2[mm]$

Tab.4.19. Hodnoty e_C pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	32,2	TiGr2	32,2
17 348.4	32,2	CuZn20Al2As	34,2
VLX 439	32,2	12 021.1	35,2

Vnitřní průměr pláště D_{vniC} : $D_{vniC} = D_{exC} - 2 \cdot e_C = 3100[mm] - 2 \cdot 31,2[mm] = 3037,6[mm]$

Tab.4.20. Hodnoty D_{vniC} pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	3035,6	TiGr2	2935,6
17 348.4	3035,6	CuZn20Al2As	3231,6
VLX 439	3035,6	12 021.1	3329,6

Dovolené namáhání komory f_C :

$$f_C = \text{menší } z \left(\frac{R_{p0,2C}}{1,5} < \frac{R_{mC}}{2,4} \right) = \text{menší } z \left(\frac{215[MPa]}{1,5} < \frac{410[MPa]}{2,4} \right) = 143,333[MPa]$$

Hodnoty f_C pláště vodní komory jsou pro ostatní varianty výměníku stejné.

4.1.2 Výpočet

4.1.2.1 Průměry a šířky

Poloměr kružnice procházející středy nejvzdálenějších trubek r_0 : $r_0 = 1424 \text{ mm}$

Tab.4.21. Hodnoty r_0 pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	1424	TiGr2	1396
17 348.4	1424	CuZn20Al2As	1520
VLX 439	1450	12 021.1	1556

Maximální vnější průměr otrubkované oblasti d_{lmax} :

$$d_{lmax} = 2 \cdot r_0 + d_T = 2 \cdot 1424 [mm] + 20 [mm] = 2868 [mm]$$

Tab.4.22. Hodnoty d_{lmax} pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	2868	TiGr2	2812
17 348.4	2868	CuZn20Al2As	3060
VLX 439	2920	12 021.1	3132

Minimální plocha průřezu otrubkované oblasti $A_{r(min)}$:

Grafickou metodou v programu AutoCAD byla odečtena hodnota $A_{r(min)} = 5748392 \text{ mm}^2$

Tab.4.23. Hodnoty $A_{r(min)}$ pro všechny varianty výměníku [mm²]

17 248.4	5748392	TiGr2	5641247
17 348.4	5748392	CuZn20Al2As	6784234
VLX 439	6029442	12 021.1	7139065

Minimální vnější průměr otrubkované oblasti d_{lmin} :

$$d_{lmin} = \sqrt{\frac{4 \cdot A_{r(min)}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 5748392 [mm^2]}{\pi}} = 2705,380 [mm]$$

Tab.4.24. Hodnoty d_{lmin} pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	2705,380	TiGr2	2680,048
17 348.4	2705,380	CuZn20Al2As	2939,040
VLX 439	2770,726	12 021.1	3014,920

Střední hodnota vnějšího průměru otrubkované oblasti d_{lav} :

$$d_{lav} = \frac{d_{lmin} + d_{lmax}}{2} = \frac{2705,380 [mm] + 2868 [mm]}{2} = 2786,690 [mm]$$

Tab.4.25. Hodnoty d_{lav} pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	2786,690	TiGr2	2746,024
17 348.4	2786,690	CuZn20Al2As	2999,520
VLX 439	2845,363	12 021.1	3073,460

Vnější průměr otrubkované oblasti d_l :

Nejdříve je nutné vypočítat:

$$\Delta d_{act} = d_{lmax} - d_{lmin} = 2868 [mm] - 2705,380 [mm] = 162,620 [mm]$$

Tab.4.26. Hodnoty d_{act} pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	162,620	TiGr2	131,952
17 348.4	162,620	CuZn20Al2As	120,960
VLX 439	149,274	12 021.1	117,081

$$\Delta d_{all} = \min \{1 \cdot p; 0,03 \cdot d_{lav}\} = \min \{1 \cdot 28 [mm]; 0,03 \cdot 2786,690 [mm]\} = 28 [mm]$$

Hodnoty Δd_{all} jsou pro ostatní varianty výměníku stejné.

Podmínka:

$$\Delta d_{act} \leq \Delta d_{all}$$

$$162,620[mm] \leq 28[mm]$$

NEVYHOVUJE

Tab.4.27. Podmínka pro všechny varianty výměníku

17 248.4	NEVYHOVUJE	TiGr2	NEVYHOVUJE
17 348.4	NEVYHOVUJE	CuZn20Al2As	NEVYHOVUJE
VLX 439	NEVYHOVUJE	12 021.1	NEVYHOVUJE

Podmínka nesplněna:

Proto:

$$M = \text{Integer}\left(\frac{\Delta d_{act}}{\Delta d_{all}}\right) + 1 = \text{Integer}\left(\frac{162,620}{28}\right) + 1 = 6$$

$$\text{kde } \text{Integer}\left(\frac{\Delta d_{act}}{\Delta d_{all}}\right) \text{ je celé číslo menší nebo rovné hodnotě } \left(\frac{\Delta d_{act}}{\Delta d_{all}}\right)$$

Tab.4.28. Hodnoty M pro všechny varianty výměníku

17 248.4	6	TiGr2	5
17 348.4	6	CuZn20Al2As	5
VLX 439	6	12 021.1	5

pak:

$$d_1 = d_{1\min} + (0,1,2 \dots M-1) \cdot \frac{d_{1\max} - d_{1\min}}{M-1} = 2705,380 + (0,1,2 \dots 5) \cdot \frac{2868 - 2705,380}{6-1} = 2868[mm]$$

Tab.4.29. Hodnoty d_1 pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	2868	TiGr2	2812
17 348.4	2868	CuZn20Al2As	3029,760
VLX 439	2920	12 021.1	3132

Ostatní průměry, šířky a parametrySkutečný vnější průměr, na kterém působí P_S a P_T d_2 :

$$d_2 = \min(D_{vnitC}; D_{vnitS}) = \min(3035,6[mm]; 3571,2[mm]) = 3035,6[mm]$$

Tab.4.30. Hodnoty d_2 pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	3035,6	TiGr2	2935,6
17 348.4	3035,6	CuZn20Al2As	3231,6
VLX 439	3035,6	12 021.1	3329,6

Střední šířka neotrubkovaného okraje při působení tlaku z obou stran b_R :

$$b_R = \frac{d_2 - d_1}{2} = \frac{3037,6[mm] - 2868[mm]}{2} = 84,8[mm]$$

Tab.4.31. Hodnoty b_R pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	84,8	TiGr2	61,8
17 348.4	84,8	CuZn20Al2As	101,92
VLX 439	58,8	12 021.1	99,8

Skutečná šířka neotrubkovaného okraje b_S :

Naměřena v programu AutoCAD.

Tab.4.32. Hodnoty b_S pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	-367	TiGr2	-255
17 348.4	-367	CuZn20Al2As	-409
VLX 439	-367	12 021.1	-310

Geometrické parametry pro neotrubkované okraje:

$$\lambda_R = 2 \cdot \frac{b_R}{d_1} = 2 \cdot \frac{84,8[mm]}{2868[mm]} = 0,059 \leq 0,30 \quad \text{VYHOVUJE}$$

Tab.4.33. Hodnoty λ_R pro všechny varianty výměníku

17 248.4	0,059	TiGr2	0,044
17 348.4	0,059	CuZn20Al2As	0,067
VLX 439	0,040	12 021.1	0,064

$$\lambda_S = 2 \cdot \frac{b_S}{d_2} = 2 \cdot \frac{-367[mm]}{3037,6[mm]} = -0,242 \leq 0,30 \quad \text{VYHOVUJE}$$

Tab.4.34. Hodnoty λ_S pro všechny varianty výměníku

17 248.4	-0,242	TiGr2	-0,174
17 348.4	-0,242	CuZn20Al2As	-0,253
VLX 439	-0,242	12 021.1	-0,186

4.1.2.2 Otvary v trubkovnici

Součinitel relativní pevnosti pro spoj trubky s trubkovnicí δ_X :

$$\delta_X = \min\left(1; \frac{f_T}{f_p}\right) = \min\left(1; \frac{130}{108}\right) = 1$$

Tab.4.35. Hodnoty δ_X pro všechny varianty výměníku

17 248.4	1	TiGr2	1
17 348.4	1	CuZn20Al2As	0,772
VLX 439	1	12 021.1	1

Plocha průřezu otrubkované oblasti A_X :

$$A_X = (l_X + \sqrt{d_T \cdot e_T}) \cdot e_T = (262[mm] + \sqrt{20[mm] \cdot 1[mm]}) \cdot 1[mm] = 266,472[mm^2]$$

Tab.4.36. Hodnoty A_X pro všechny varianty výměníku [mm²]

17 248.4	266,472	TiGr2	193,719
17 348.4	266,472	CuZn20Al2As	396,716
VLX 439	263,472	12 021.1	395,216

Efektivní průměr otvorů pro trubky:

$$d_{0e} = \max(d_0 - 2 \cdot \delta_X \cdot \frac{A_X}{e_P}; d_T - 2 \cdot e_T) =$$

$$= \max(20,4[mm] - 2 \cdot 1[mm] \cdot \frac{266,472[mm^2]}{262[mm]}; 20[mm] - 2 \cdot 1[mm]) = 18,366[mm]$$

Tab.4.37. Hodnoty d_{0e} pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	18,366	TiGr2	18,981
17 348.4	18,366	CuZn20Al2As	18,036
VLX 439	18,365	12 021.1	17,336

Parametry ekvivalentní zeslabené desky

Relativní pevnost v ohybu φ_P :

$$\varphi_P = 1 - \frac{d_{0e}}{p} = 1 - \frac{18,366[mm]}{28[mm]} = 0,344$$

Tab.4.38. Hodnoty φ_P pro všechny varianty výměníku

17 248.4	0,344	TiGr2	0,322
17 348.4	0,344	CuZn20Al2As	0,356
VLX 439	0,344	12 021.1	0,381

Relativní pevnost ve smyku κ_P :

pro $\varphi_P < 0,50$

$$\kappa_P = \sqrt{\varphi_P \cdot (1 - \varphi_P)} = \sqrt{0,344(1 - 0,344)} = 0,475$$

Tab.4.39. Hodnoty κ_P pro všechny varianty výměníku

17 248.4	0,475	TiGr2	0,467
17 348.4	0,475	CuZn20Al2As	0,479
VLX 439	0,475	12 021.1	0,486

4.1.2.3 Trubkovnice podepřená přímými trubkami

Relativní plochy v otrubkované oblasti:

$$x_T = 1 - N_t \cdot \left(\frac{d_T - 2 \cdot e_T}{d_1} \right)^2 = 1 - 8566 \cdot \left(\frac{20[mm] - 2 \cdot 1[mm]}{2868[mm]} \right)^2 = 0,663$$

Tab.4.40. Hodnoty x_T pro všechny varianty výměníku

17 248.4	0,663	TiGr2	0,631
17 348.4	0,663	CuZn20Al2As	0,683
VLX 439	0,658	12 021.1	0,687

$$x_S = 1 - N_t \cdot \left(\frac{d_T}{d_1} \right)^2 = 1 - 8566 \cdot \left(\frac{20[mm]}{2868[mm]} \right)^2 = 0,583$$

Tab.4.41. Hodnoty x_S pro všechny varianty výměníku

17 248.4	0,583	TiGr2	0,574
17 348.4	0,583	CuZn20Al2As	0,561
VLX 439	0,578	12 021.1	0,567

Relativní plocha průřezu trubek v otrubkované oblasti \mathcal{G} :

$$\mathcal{G} = x_T - x_S = 0,663 - 0,583 = 0,079$$

Tab.4.42. Hodnoty \mathcal{G} pro všechny varianty výměníku

17 248.4	0,079	TiGr2	0,058
17 348.4	0,079	CuZn20Al2As	0,122
VLX 439	0,080	12 021.1	0,120

Vzpěrná délka trubek:

Pro výměník bez podpěrných přepážek:

$$l_{TK} = 0,50 \cdot (L + 2 \cdot l_X) = 0,50 \cdot (5760[mm] + 2 \cdot 268[mm]) = 3148[mm]$$

Tab.4.43. Hodnoty l_{TK} pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	3148	TiGr2	2852
17 348.4	3147	CuZn20Al2As	2366
VLX 439	2752	12 021.1	2376

Hodnoty potřebné pro výpočet Efektivní tloušťky nebezpečného průřezu svarů na konci trubek:

Výška svaru a_X : $a_X = 5$ mm

Tab.4.44. Hodnoty a_X pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	5	TiGr2	5
17 348.4	5	CuZn20Al2As	0 – bez svaru
VLX 439	0 – bez svaru	12 021.1	5

Hodnota h_P : $h_P = 0$ mm

Hodnoty h_P jsou pro ostatní varianty výměníku stejné.

Hodnota h_T : $h_T = a_x \cdot \cos 45[^\circ] = 5[mm] \cdot \cos 45[^\circ] = 7,071[mm]$

Tab.4.45. Hodnoty h_T pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	7,071	TiGr2	7,071
17 348.4	7,071	CuZn20Al2As	0 – bez svaru
VLX 439	0 – bez svaru	12 021.1	7,071

Hodnota h_R : $h_R = \frac{h_P + h_T}{2} = \frac{0[mm] + 7,071[mm]}{2} = 3,536[mm]$

Tab.4.46. Hodnoty h_R pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	3,536	TiGr2	3,536
17 348.4	3,536	CuZn20Al2As	0 – bez svaru
VLX 439	0 – bez svaru	12 021.1	3,536

Hodnota w_P : $w_P = h_T - \left(\frac{d_0 - d_T}{2} \right) = 7,071[mm] - \left(\frac{20,4[mm] - 20[mm]}{2} \right) = 6,871[mm]$

Tab.4.47. Hodnoty w_P pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	6,871	TiGr2	6,871
17 348.4	6,871	CuZn20Al2As	0 – bez svaru
VLX 439	0 – bez svaru	12 021.1	6,871

Hodnoty w_T : $w_T = 0$ mm

Hodnoty w_T jsou pro ostatní varianty výměníku stejné.

Hodnota w_R : $w_R = \frac{w_P + w_T}{2} = \frac{6,871[mm] + 0[mm]}{2} = 3,436[mm]$

Tab.4.48. Hodnoty w_P pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	3,436	TiGr2	3,436
17 348.4	3,436	CuZn20Al2As	0 – bez svaru
VLX 439	0 – bez svaru	12 021.1	3,436

Efektivní tloušťka nebezpečného průřezu svarů na konci trubek:

$$a_{T,P} = \frac{0,6 \cdot h_P^2 + w_P^2}{\sqrt{h_P^2 + w_P^2}} = \frac{0,6 \cdot 0^2 [mm^2] + 6,871^2 [mm^2]}{\sqrt{0^2 [mm^2] + 6,871^2 [mm^2]}} = 6,871[mm]$$

Tab.4.49. Hodnoty $a_{T,P}$ pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	6,871	TiGr2	6,871
17 348.4	6,871	CuZn20Al2As	0 – bez svaru
VLX 439	0 – bez svaru	12 021.1	6,871

$$a_{T,R} = \frac{0,6 \cdot h_R^2 + w_R^2}{\sqrt{h_R^2 + w_R^2}} = \frac{0,6 \cdot 3,536^2 [mm^2] + 3,436^2 [mm^2]}{\sqrt{3,536^2 [mm^2] + 3,436^2 [mm^2]}} = 3,916 [mm]$$

Tab.4.50. Hodnoty $a_{T,R}$ pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	3,916	TiGr2	3,916
17 348.4	3,916	CuZn20Al2As	0 – bez svaru
VLX 439	0 – bez svaru	12 021.1	3,916

$$a_{T,T} = \frac{0,6 \cdot h_T^2 + w_T^2}{\sqrt{h_T^2 + w_T^2}} = \frac{0,6 \cdot 7,071^2 [mm^2] + 0^2 [mm^2]}{\sqrt{7,071^2 [mm^2] + 0^2 [mm^2]}} = 4,243 [mm]$$

Tab.4.51. Hodnoty $a_{T,T}$ pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	4,243	TiGr2	4,243
17 348.4	4,243	CuZn20Al2As	0 – bez svaru
VLX 439	0 – bez svaru	12 021.1	4,243

4.1.2.4 Aktivní přímé tlaky

Přímý rozdíl tlaků tekutiny na celou trubkovnici P_D :

Viz.Tab.4.1., kombinace zatěžování trubkovnice pracovními médii.

Pro každou variantu výměníku bude detailně ukázán výpočet pro kombinaci, že působí pouze tlak P_T a pro ostatní kombinace z Tab.4.1 budou uvedeny pouze výsledky

$$P_D = P_T - P_S = 2,5 [MPa] - 0 [MPa] = 2,5 [MPa]$$

Tab.4.52. Hodnoty P_D pro všechny zatěžující stavy trubkovnice [MPa]

P_T	2,5	P_T	2,5
P_{S1}	-0,4	P_{S2}	0,1
P_T, P_{S1}	2,1	P_T, P_{S2}	2,6

Hodnoty P_D jsou pro ostatní materiály trubek stejné.

Efektivní rozdíl tlaků tekutiny v otrubkované oblasti trubkovnice P_E :

$$P_E = P_T \cdot x_T - P_S \cdot x_S = 2,5 [MPa] \cdot 0,663 - 0 [MPa] \cdot 0,583 = 1,656 [MPa]$$

V následujících tabulkách jsou uvedeny výsledky pro jednotlivé materiály trubek:

Tab.4.53. Hodnoty P_E pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku 17 248.4 [MPa]

P_T	1,656	P_T	1,656
P_{S1}	-0,233	P_{S2}	0,058
P_T, P_{S1}	1,423	P_T, P_{S2}	1,715

Tab.4.54. Hodnoty P_E pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **17 348.4** [MPa]

P_T	1,656	P_T	1,656
P_{S1}	-0,233	P_{S2}	0,058
P_T, P_{S1}	1,423	P_T, P_{S2}	1,715

Tab.4.55. Hodnoty P_E pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **VLX 439** [MPa]

P_T	1,645	P_T	1,645
P_{S1}	-0,231	P_{S2}	0,058
P_T, P_{S1}	1,414	P_T, P_{S2}	1,703

Tab.4.56. Hodnoty P_E pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **TiGr2** [MPa]

P_T	1,579	P_T	1,579
P_{S1}	-0,230	P_{S2}	0,057
P_T, P_{S1}	1,349	P_T, P_{S2}	1,636

Tab.4.57. Hodnoty P_E pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **CuZn20Al2As** [MPa]

P_T	1,706	P_T	1,706
P_{S1}	-0,224	P_{S2}	0,056
P_T, P_{S1}	1,482	P_T, P_{S2}	1,762

Tab.4.58. Hodnoty P_E pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **12 021.1** [MPa]

P_T	1,718	P_T	1,718
P_{S1}	-0,227	P_{S2}	0,057
P_T, P_{S1}	1,491	P_T, P_{S2}	1,775

4.1.2.5 Trubkové podpěry

Dovolená podélná napětí v trubkách

Dovolené podélné tahové napětí v trubkách $f_{T,t}$:

$$f_{T,t} = f_T - \frac{|P_S| \cdot d_T}{2 \cdot e_T} = 130 [\text{MPa}] - \frac{0 [\text{MPa}] \cdot 20 [\text{mm}]}{2 \cdot 1 [\text{mm}]} = 130 [\text{MPa}]$$

Tab.4.59. Hodnoty $f_{T,t}$ pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **17 248.4** [MPa]

P_T	130	P_T	130
P_{S1}	126	P_{S2}	129
P_T, P_{S1}	126	P_T, P_{S2}	129

Tab.4.60. Hodnoty $f_{T,t}$ pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **17 348.4** [MPa]

P_T	136,667	P_T	136,667
P_{S1}	132,667	P_{S2}	135,667
P_T, P_{S1}	132,667	P_T, P_{S2}	135,667

Tab.4.61. Hodnoty $f_{T,t}$ pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **VLX 439** [MPa]

P_T	143,333	P_T	143,333
P_{S1}	139,333	P_{S2}	142,333
P_T, P_{S1}	139,333	P_T, P_{S2}	142,333

Tab.4.62. Hodnoty $f_{T,t}$ pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **TiGr2** [MPa]

P_T	130	P_T	130
P_{S1}	124,286	P_{S2}	128,571
P_T, P_{S1}	124,286	P_T, P_{S2}	128,571

Tab.4.63. Hodnoty $f_{T,t}$ pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **CuZn20Al2As** [MPa]

P_T	83,333	P_T	83,333
P_{S1}	80,667	P_{S2}	82,667
P_T, P_{S1}	80,667	P_T, P_{S2}	82,667

Tab.4.64. Hodnoty $f_{T,t}$ pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **12 021.1** [MPa]

P_T	128	P_T	128
P_{S1}	125,333	P_{S2}	127,333
P_T, P_{S1}	125,333	P_T, P_{S2}	127,333

Aktivní podélné tlakové napětí v trubkách σ_{TP} :

$$\sigma_{TP} = \frac{P_S \cdot d_T^2 - P_T \cdot (d_T - 2 \cdot e_T)^2}{6 \cdot (d_T - e_T) \cdot e_T} = \frac{0[MPa] \cdot 20^2 [mm^2] - 2,5[MPa] \cdot (20[mm] - 2 \cdot 1[mm])^2}{6 \cdot (20[mm] - 1[mm]) \cdot 1[mm]} = -7,105[MPa]$$

Tab.4.65. Hodnoty σ_{TP} pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **17 248.4** [MPa]

P_T	-7,105	P_T	-7,105
P_{S1}	1,404	P_{S2}	-0,351
P_T, P_{S1}	-5,702	P_T, P_{S2}	-7,456

Tab.4.66. Hodnoty σ_{TP} pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **17 348.4** [MPa]

P_T	-7,105	P_T	-7,105
P_{S1}	1,404	P_{S2}	-0,351
P_T, P_{S1}	-5,702	P_T, P_{S2}	-7,456

Tab.4.67. Hodnoty σ_{TP} pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **VLX 439** [MPa]

P_T	-7,105	P_T	-7,105
P_{S1}	1,404	P_{S2}	-0,351
P_T, P_{S1}	-5,702	P_T, P_{S2}	-7,456

Tab.4.68. Hodnoty σ_{TP} pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **TiGr2** [MPa]

P_T	-10,670	P_T	-10,670
P_{S1}	1,974	P_{S2}	-0,493
P_T, P_{S1}	-8,696	P_T, P_{S2}	-11,163

Tab.4.69. Hodnoty σ_{TP} pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **CuZn20Al2As** [MPa]

P_T	-4,339	P_T	-4,339
P_{S1}	0,961	P_{S2}	-0,240
P_T, P_{S1}	-3,378	P_T, P_{S2}	-4,580

Tab.4.70. Hodnoty σ_{TP} pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **12 021.1** [MPa]

P_T	-4,339	P_T	-4,339
P_{S1}	0,961	P_{S2}	-0,240
P_T, P_{S1}	-3,378	P_T, P_{S2}	-4,580

Dovolené podélné tlakové napětí v trubkách $f_{T,c}$:

$$f_{T,c} = \sigma_{TP} + \frac{f_T - |\sigma_{TP}|}{\sqrt{1 + \left\{ \frac{1,216}{E_T} \cdot (1,30 \cdot f_T - |\sigma_{TP}|) \cdot \left(\frac{l_{TK}}{d_T - e_T} \right) \right\}^2}} =$$

$$= -7,105 [MPa] + \frac{130 [MPa] - 7,105 [MPa]}{\sqrt{1 + \left\{ \frac{1,216}{190000 [MPa]} \cdot (1,30 \cdot 130 [MPa] - 7,105 [MPa]) \cdot \left(\frac{3148 [mm]}{20 [mm] - 1 [mm]} \right) \right\}^2}} =$$

$$= -2,787 [MPa]$$

Tab.4.71. Hodnoty $f_{T,c}$ pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **17 248.4** [MPa]

P_T	-2,787	P_T	-2,787
P_{S1}	5,768	P_{S2}	4,022
P_T, P_{S1}	-1,372	P_T, P_{S2}	-3,141

Tab.4.72. Hodnoty $f_{T,c}$ pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **17 348.4** [MPa]

P_T	-2,781	P_T	-2,781
P_{S1}	5,772	P_{S2}	4,025
P_T, P_{S1}	-1,367	P_T, P_{S2}	-3,135

Tab.4.73. Hodnoty $f_{T,c}$ pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **VLX 439** [MPa]

P_T	-1,271	P_T	-1,271
P_{S1}	7,085	P_{S2}	5,340
P_T, P_{S1}	0,043	P_T, P_{S2}	-1,729

Tab.4.74. Hodnoty $f_{T,c}$ pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **TiGr2** [MPa]

P_T	-7,747	P_T	-7,747
P_{S1}	4,946	P_{S2}	2,487
P_T, P_{S1}	-5,762	P_T, P_{S2}	-8,244

Tab.4.75. Hodnoty $f_{T,c}$ pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **CuZn20Al2As** [MPa]

P_T	-0,258	P_T	-0,258
P_{S1}	5,083	P_{S2}	3,890
P_T, P_{S1}	0,715	P_T, P_{S2}	-0,502

Tab.4.76. Hodnoty $f_{T,c}$ pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **12 021.1** [MPa]

P_T	3,028	P_T	3,028
P_{S1}	8,375	P_{S2}	7,184
P_T, P_{S1}	4,002	P_T, P_{S2}	2,784

Vypočtené konstrukční napětí pro spoj trubky s trubkovnicíPro zaválcované a přivařené konce trubek: ne pro VLX 439 a CuZn20Al2AsNejdříve je potřeba stanovit hodnotu f_R : pro 17 248.4

$$f_R = \frac{(f_P + f_T)}{2} = \frac{(108[MPa] + 130[MPa])}{2} = 119[MPa]$$

Tab.4.77. Hodnoty f_R pro tyto varianty výměníku [MPa]

17 248.4	119	TiGr2	119
17 348.4	122,333	12 021.1	118

$$f_X = f_{XW} + 0,6 \cdot f_{XE} = \frac{\min(f_P \cdot a_{TP}; f_R \cdot a_{TR}; f_T \cdot a_{TT})}{e_T} + 0,6 \cdot \frac{2 \cdot f_T \cdot l_X \cdot \mu_X}{(d_T - e_T)} =$$

kde:

 μ_X je součinitel tření po zaválcování trubek to trubkovnice: $\mu_X = 0,25$ je pro všechny materiály stejná.

pak:

$$f_X = \frac{\min(108[MPa] \cdot 6,871[mm]; 119[MPa] \cdot 3,916[mm]; 130[MPa] \cdot 4,243[mm])}{1[mm]} +$$

$$+ 0,6 \cdot \frac{2 \cdot 130[MPa] \cdot 262[mm] \cdot 0,25}{(20[mm] - 1[mm])} = 1003,745[MPa]$$

Tab.4.78. Hodnoty f_X pro tyto varianty výměníku [MPa]

17 248.4	1003,745	TiGr2	1217,309
17 348.4	1044,376	12 021.1	843,551

Pouze pro zaválcované konce trubek: pro VLX 439 a CuZn20Al2As

$$f_X = f_{XE} = \frac{2 \cdot f_T \cdot l_X \cdot \mu_X}{(d_T - e_T)} = \frac{2 \cdot 143,333[MPa] \cdot 259[mm] \cdot 0,25}{(20[mm] - 1[mm])} = 976,930[MPa]$$

Tab.4.79. Hodnoty f_X pro tyto varianty výměníku [MPa]

VLX 439	976,930	CuZn20Al2As	583,333
---------	---------	-------------	---------

Dovolené axiální síly na jednotku plochy trubkového svazku $[Q_t]$ a $[Q_c]$:

Pro 17 248.4

$$[Q_t] = \vartheta \cdot \min(f_{Tf}; f_X) = 0,079 \cdot \min(130[MPa]; 1003,745[MPa]) = 10,289[MPa]$$

Tab.4.80. Hodnoty $[Q_t]$ pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku 17 248.4 [MPa]

P _T	10,289	P _T	10,289
P _{S1}	9,972	P _{S2}	10,210
P _T , P _{S1}	9,972	P _T , P _{S2}	10,210

Tab.4.81. Hodnoty $[Q_c]$ pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **17 348.4** [MPa]

P_T	10,817	P_T	10,817
P_{S1}	10,500	P_{S2}	10,738
P_T, P_{S1}	10,500	P_T, P_{S2}	10,738

Tab.4.82. Hodnoty $[Q_c]$ pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **VLX 439** [MPa]

P_T	11,493	P_T	11,493
P_{S1}	11,173	P_{S2}	11,413
P_T, P_{S1}	11,173	P_T, P_{S2}	11,413

Tab.4.83. Hodnoty $[Q_c]$ pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **TiGr2** [MPa]

P_T	7,484	P_T	7,484
P_{S1}	7,155	P_{S2}	7,402
P_T, P_{S1}	7,155	P_T, P_{S2}	7,402

Tab.4.84. Hodnoty $[Q_c]$ pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **CuZn20Al2As** [MPa]

P_T	10,162	P_T	10,162
P_{S1}	9,836	P_{S2}	10,080
P_T, P_{S1}	9,836	P_T, P_{S2}	10,080

Tab.4.85. Hodnoty $[Q_c]$ pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **12 021.1** [MPa]

P_T	15,376	P_T	15,376
P_{S1}	15,056	P_{S2}	16,296
P_T, P_{S1}	15,056	P_T, P_{S2}	16,296

Pro 17 248.4

$$[Q_c] = \vartheta \cdot \min(f_{Tc}; f_X) = 0,079 \cdot \min(-2,787[MPa]; 1026,503[MPa]) = -0,221[MPa]$$

Tab.4.86. Hodnoty $[Q_c]$ pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **17 248.4** [MPa]

P_T	-0,221	P_T	-0,221
P_{S1}	0,457	P_{S2}	0,318
P_T, P_{S1}	-0,109	P_T, P_{S2}	-0,249

Tab.4.87. Hodnoty $[Q_c]$ pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **17 348.4** [MPa]

P_T	-0,220	P_T	-0,220
P_{S1}	0,457	P_{S2}	0,319
P_T, P_{S1}	-0,108	P_T, P_{S2}	-0,248

Tab.4.88. Hodnoty $[Q_c]$ pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **VLX 439** [MPa]

P_T	-0,102	P_T	-0,102
P_{S1}	0,568	P_{S2}	0,428
P_T, P_{S1}	0,003	P_T, P_{S2}	-0,139

Tab.4.89. Hodnoty $[Q_c]$ pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **TiGr2** [MPa]

P_T	-0,446	P_T	-0,446
P_{S1}	0,285	P_{S2}	0,143
P_T, P_{S1}	-0,332	P_T, P_{S2}	-0,475

Tab.4.90. Hodnoty $[Q_c]$ pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **CuZn20Al2As** [MPa]

P_T	-0,032	P_T	-0,032
P_{S1}	0,620	P_{S2}	0,474
P_T, P_{S1}	0,087	P_T, P_{S2}	-0,061

Tab.4.91. Hodnoty $[Q_c]$ pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **12 021.1** [MPa]

P_T	0,364	P_T	0,364
P_{S1}	1,006	P_{S2}	0,863
P_T, P_{S1}	0,481	P_T, P_{S2}	0,334

Podmínka:

$$-[Q_c] < +[Q_t]$$

$$+0,221[MPa] < +10,289[MPa]$$

VYHOVUJE

VYHOVUJE pro všechny varianty výměníku.

Tlak reprezentující výslednou aktivní axiální smykovou sílu na vnějším okraji otrubkované oblasti P_R :nejdříve vnitřní průměr kompenzátoru d_k :**Tab.4.92.** Hodnoty d_k pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	3700	TiGr2	3500
17 348.4	3700	CuZn20Al2As	3900
VLX 439	3700	12 021.1	3900

pak:

$$P_R = +P_D + P_S \cdot \left(\frac{d_k}{d_1}\right)^2 = 2,5[MPa] + 0[MPa] \cdot \left(\frac{3700[mm]}{2868[mm]}\right)^2 = 2,5[MPa]$$

Tab.4.93. Hodnoty P_R pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **17 248.4** [MPa]

P_T	2,5	P_T	2,5
P_{S1}	0,266	P_{S2}	-0,066
P_T, P_{S1}	2,766	P_T, P_{S2}	2,434

Tab.4.94. Hodnoty P_R pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **17 348.4** [MPa]

P_T	2,5	P_T	2,5
P_{S1}	0,266	P_{S2}	-0,066
P_T, P_{S1}	2,766	P_T, P_{S2}	2,434

Tab.4.95. Hodnoty P_R pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **VLX 439** [MPa]

P_T	2,5	P_T	2,5
P_{S1}	0,242	P_{S2}	-0,061
P_T, P_{S1}	2,742	P_T, P_{S2}	2,439

Tab.4.96. Hodnoty P_R pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **TiGr2** [MPa]

P_T	2,5	P_T	2,5
P_{S1}	0,220	P_{S2}	-0,055
P_T, P_{S1}	2,720	P_T, P_{S2}	2,445

Tab.4.97. Hodnoty P_R pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **CuZn20Al2As** [MPa]

P_T	2,5	P_T	2,5
P_{S1}	0,263	P_{S2}	-0,066
P_T, P_{S1}	2,763	P_T, P_{S2}	2,434

Tab.4.98. Hodnoty P_R pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **12 021.1** [MPa]

P_T	2,5	P_T	2,5
P_{S1}	0,220	P_{S2}	-0,055
P_T, P_{S1}	2,720	P_T, P_{S2}	2,445

4.1.2.6 Reakční tlaky

Pro:

$$P_E > +[Q_c]: \quad Q_I = -[Q_c]$$

$$Q_A = +[Q_t]$$

Pro:

$$-[Q_t] \leq P_E \leq +[Q_c]: \quad Q_I = -P_E$$

Pro:

$$P_R > 0: \quad Q_A = +[Q_t]$$

$$P_R < 0: \quad Q_A = -[Q_c]$$

Hodnoty Q_i :**Tab.4.99.** Hodnoty Q_i pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **17 248.4** [MPa]

P_T	0,221	P_T	0,221
P_{S1}	0,233	P_{S2}	-0,058
P_T, P_{S1}	0,109	P_T, P_{S2}	0,249

Tab.4.100. Hodnoty Q_i pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **17 348.4** [MPa]

P_T	0,220	P_T	0,220
P_{S1}	0,233	P_{S2}	-0,058
P_T, P_{S1}	0,108	P_T, P_{S2}	0,248

Tab.4.101. Hodnoty Q_i pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **VLX 439** [MPa]

P_T	0,102	P_T	0,102
P_{S1}	0,231	P_{S2}	-0,058
P_T, P_{S1}	-0,003	P_T, P_{S2}	0,139

Tab.4.102. Hodnoty Q_I pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **TiGr2** [MPa]

P_T	0,446	P_T	0,446
P_{S1}	0,230	P_{S2}	-0,144
P_T, P_{S1}	0,332	P_T, P_{S2}	0,475

Tab.4.103. Hodnoty Q_I pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **CuZn20Al2As** [MPa]

P_T	0,031	P_T	0,031
P_{S1}	0,224	P_{S2}	-0,056
P_T, P_{S1}	-0,087	P_T, P_{S2}	0,054

Tab.4.104. Hodnoty Q_I pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **12 021.1** [MPa]

P_T	-0,364	P_T	-0,364
P_{S1}	0,227	P_{S2}	-0,057
P_T, P_{S1}	-0,481	P_T, P_{S2}	-0,334

Hodnoty Q_A :**Tab.4.105.** Hodnoty Q_A pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **17 248.4** [MPa]

P_T	10,289	P_T	10,298
P_{S1}	9,972	P_{S2}	-0,318
P_T, P_{S1}	9,972	P_T, P_{S2}	10,210

Tab.4.106. Hodnoty Q_A pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **17 348.4** [MPa]

P_T	10,818	P_T	10,818
P_{S1}	10,500	P_{S2}	-0,319
P_T, P_{S1}	10,500	P_T, P_{S2}	10,738

Tab.4.107. Hodnoty Q_A pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **VLX 439** [MPa]

P_T	11,493	P_T	11,493
P_{S1}	11,173	P_{S2}	-0,428
P_T, P_{S1}	11,173	P_T, P_{S2}	11,413

Tab.4.108. Hodnoty Q_A pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **TiGr2** [MPa]

P_T	7,484	P_T	7,484
P_{S1}	7,155	P_{S2}	-0,143
P_T, P_{S1}	7,155	P_T, P_{S2}	7,402

Tab.4.109. Hodnoty Q_A pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **CuZn20Al2As** [MPa]

P_T	10,161	P_T	10,161
P_{S1}	9,836	P_{S2}	-0,474
P_T, P_{S1}	9,836	P_T, P_{S2}	10,080

Tab.4.110. Hodnoty Q_A pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **12 021.1** [MPa]

P_T	15,376	P_T	15,376
P_{S1}	15,056	P_{S2}	-0,863
P_T, P_{S1}	15,056	P_T, P_{S2}	15,296

4.1.2.7 Určující tlak reprezentující výslednou efektivní axiální sílu

Výsledné aktivní a reakční axiální síly na jednotku plochy v trubkovém svazku

Hodnoty P_I :

$$P_I = P_E + Q_I = 1,656[MPa] + 0,221[MPa] = 1,877[MPa]$$

Tab.4.111. Hodnoty P_I pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **17 248.4** [MPa]

P_T	1,877	P_T	1,877
P_{S1}	0	P_{S2}	0
P_T, P_{S1}	1,532	P_T, P_{S2}	1,963

Tab.4.112. Hodnoty P_I pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **17 348.4** [MPa]

P_T	1,877	P_T	1,877
P_{S1}	0	P_{S2}	0
P_T, P_{S1}	1,531	P_T, P_{S2}	1,963

Tab.4.113. Hodnoty P_I pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **VLX 439** [MPa]

P_T	1,747	P_T	1,747
P_{S1}	0	P_{S2}	0
P_T, P_{S1}	1,411	P_T, P_{S2}	1,842

Tab.4.114. Hodnoty P_I pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **TiGr2** [MPa]

P_T	2,025	P_T	2,025
P_{S1}	0	P_{S2}	0
P_T, P_{S1}	1,681	P_T, P_{S2}	2,111

Tab.4.115. Hodnoty P_I pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **CuZn20Al2As** [MPa]

P_T	1,738	P_T	1,738
P_{S1}	0	P_{S2}	0
P_T, P_{S1}	1,395	P_T, P_{S2}	1,824

Tab.4.116. Hodnoty P_I pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **12 021.1** [MPa]

P_T	1,354	P_T	1,354
P_{S1}	0	P_{S2}	0
P_T, P_{S1}	1,010	P_T, P_{S2}	1,440

Hodnoty P_A : $P_A = P_E + Q_A = 1,656[MPa] + 10,289[MPa] = 11,946[MPa]$

Tab.4.117. Hodnoty P_A pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **17 248.4** [MPa]

P_T	11,946	P_T	11,946
P_{S1}	9,739	P_{S2}	-0,260
P_T, P_{S1}	11,396	P_T, P_{S2}	11,925

Tab.4.118. Hodnoty P_A pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **17 348.4** [MPa]

P_T	12,473	P_T	12,473
P_{S1}	10,267	P_{S2}	-0,260
P_T, P_{S1}	11,923	P_T, P_{S2}	12,452

Tab.4.119. Hodnoty P_A pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **VLX 439** [MPa]

P_T	13,139	P_T	13,139
P_{S1}	10,941	P_{S2}	-0,370
P_T, P_{S1}	12,587	P_T, P_{S2}	13,116

Tab.4.120. Hodnoty P_A pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **TiGr2** [MPa]

P_T	9,063	P_T	9,063
P_{S1}	6,926	P_{S2}	-0,086
P_T, P_{S1}	8,504	P_T, P_{S2}	9,038

Tab.4.121. Hodnoty P_A pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **CuZn20Al2As** [MPa]

P_T	11,868	P_T	11,868
P_{S1}	9,612	P_{S2}	-0,418
P_T, P_{S1}	11,318	P_T, P_{S2}	11,843

Tab.4.122. Hodnoty P_A pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **12 021.1** [MPa]

P_T	17,094	P_T	17,094
P_{S1}	14,829	P_{S2}	-0,806
P_T, P_{S1}	16,547	P_T, P_{S2}	17,071

Parametr rozdělení sil ζ^2 :

$$\zeta^2 = \frac{P_A - P_R}{P_A - P_I} = \frac{11,946 [\text{MPa}] - 2,5 [\text{MPa}]}{11,946 [\text{MPa}] - 1,877 [\text{MPa}]} = 0,938 \quad 0 \leq 0,938 \leq 1$$

VYHOVUJE

Tab.4.123. Hodnoty ζ^2 pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **17 248.4**

P_T	0,938	P_T	0,938
P_{S1}	0,973	P_{S2}	0,744
P_T, P_{S1}	0,875	P_T, P_{S2}	0,953

Tab.4.124. Hodnoty ζ^2 pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **17 348.4**

P_T	0,941	P_T	0,941
P_{S1}	0,974	P_{S2}	0,745
P_T, P_{S1}	0,881	P_T, P_{S2}	0,955

Tab.4.125. Hodnoty ζ^2 pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **VLX 439**

P_T	0,934	P_T	0,934
P_{S1}	0,978	P_{S2}	0,837
P_T, P_{S1}	0,881	P_T, P_{S2}	0,947

Tab.4.126. Hodnoty ζ^2 pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **TiGr2**

P_T	0,932	P_T	0,932
P_{S1}	0,968	P_{S2}	0,360
P_T, P_{S1}	0,848	P_T, P_{S2}	0,952

Tab.4.127. Hodnoty ζ^2 pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **CuZn20Al2As**

P_T	0,925	P_T	0,925
P_{S1}	0,973	P_{S2}	0,843
P_T, P_{S1}	0,862	P_T, P_{S2}	0,939

Tab.4.128. Hodnoty ζ^2 pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **12 021.1**

P_T	0,927	P_T	0,927
P_{S1}	0,985	P_{S2}	0,932
P_T, P_{S1}	0,890	P_T, P_{S2}	0,936

Určující tlak

Nejdříve se vypočte:

Hodnota η_{min}^2 :

$$\eta_{min}^2 = \frac{12 \cdot \kappa_p \cdot \varphi_p \cdot e_p^2}{|P_A| \cdot d_1^2} = \frac{12 \cdot 0,475 \cdot 0,344 \cdot 262^2 [mm^2]}{|11,946| [MPa] \cdot 2868^2 [mm^2]} = 0,148$$

Tab.4.129. Hodnoty η_{min}^2 pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **17 248.4**

P_T	0,148	P_T	0,148
P_{S1}	0,182	P_{S2}	6,765
P_T, P_{S1}	0,155	P_T, P_{S2}	0,148

Tab.4.130. Hodnoty η_{min}^2 pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **17 348.4**

P_T	0,142	P_T	0,142
P_{S1}	0,172	P_{S2}	6,764
P_T, P_{S1}	0,148	P_T, P_{S2}	0,142

Tab.4.131. Hodnoty η_{min}^2 pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **VLX 439**

P_T	0,127	P_T	0,127
P_{S1}	0,152	P_{S2}	4,488
P_T, P_{S1}	0,132	P_T, P_{S2}	0,127

Tab.4.132. Hodnoty η_{min}^2 pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **TiGr2**

P_T	0,203	P_T	0,203
P_{S1}	0,265	P_{S2}	0,246
P_T, P_{S1}	0,216	P_T, P_{S2}	0,203

Tab.4.133. Hodnoty η_{min}^2 pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **CuZn20Al2As**

P_T	0,136	P_T	0,136
P_{S1}	0,168	P_{S2}	3,791
P_T, P_{S1}	0,143	P_T, P_{S2}	0,136

Tab.4.134. Hodnoty η_{min}^2 pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **12 021.1**

P_T	0,095	P_T	0,095
P_{S1}	0,110	P_{S2}	2,030
P_T, P_{S1}	0,098	P_T, P_{S2}	0,095

Pomocné parametry:

Hodnota u :

$$u = \zeta^2 \cdot \left| \frac{P_I}{P_A} \right| = 0,938 \cdot \left| \frac{1,877}{11,946} \right| = 0,147$$

Tab.4.135. Hodnoty u pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **17 248.4**

P_T	0,147	P_T	0,147
P_{S1}	0	P_{S2}	0
P_T, P_{S1}	0,117	P_T, P_{S2}	0,157

Tab.4.136. Hodnoty u pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **17 348.4**

P_T	0,142	P_T	0,142
P_{S1}	0	P_{S2}	0
P_T, P_{S1}	0,113	P_T, P_{S2}	0,150

Tab.4.137. Hodnoty u pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **VLX 439**

P_T	0,124	P_T	0,124
P_{S1}	0	P_{S2}	0
P_T, P_{S1}	0,099	P_T, P_{S2}	0,133

Tab.4.138. Hodnoty u pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **TiGr2**

P_T	0,208	P_T	0,208
P_{S1}	0	P_{S2}	0,012
P_T, P_{S1}	0,167	P_T, P_{S2}	0,222

Tab.4.139. Hodnoty u pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **CuZn20Al2As**

P_T	0,135	P_T	0,135
P_{S1}	0	P_{S2}	0
P_T, P_{S1}	0,106	P_T, P_{S2}	0,144

Tab.4.140. Hodnoty u pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **12 021.1**

P_T	0,074	P_T	0,074
P_{S1}	0	P_{S2}	0
P_T, P_{S1}	0,055	P_T, P_{S2}	0,079

Hodnota v :

$$v = \eta_{\min}^2 - u = 0,147 - 0,147 = 0,001$$

Tab.4.141. Hodnoty v pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **17 248.4**

P_T	0,001	P_T	0,001
P_{S1}	0,182	P_{S2}	6,765
P_T, P_{S1}	0,038	P_T, P_{S2}	-0,009

Tab.4.142. Hodnoty v pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **17 348.4**

P_T	0,001	P_T	0,001
P_{S1}	0,172	P_{S2}	6,764
P_T, P_{S1}	0,035	P_T, P_{S2}	-0,008

Tab.4.143. Hodnoty v pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **VLX 439**

P_T	0,003	P_T	0,003
P_{S1}	0,152	P_{S2}	4,488
P_T, P_{S1}	0,034	P_T, P_{S2}	-0,006

Tab.4.144. Hodnoty v pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **TiGr2**

P_T	-0,005	P_T	-0,005
P_{S1}	0,265	P_{S2}	0,235
P_T, P_{S1}	0,049	P_T, P_{S2}	-0,019

Tab.4.145. Hodnoty v pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **CuZn20Al2As**

P_T	0,001	P_T	0,001
P_{S1}	0,198	P_{S2}	3,791
P_T, P_{S1}	0,037	P_T, P_{S2}	-0,008

Tab.4.146. Hodnoty v pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **12 021.1**

P_T	0,021	P_T	0,021
P_{S1}	0,110	P_{S2}	2,030
P_T, P_{S1}	0,044	P_T, P_{S2}	0,016

Hodnota w :

Do iteračního výpočtu vstupuje $w = 1,5$, vypočte se η^2 a pak se zpětně vypočte w a znovu η^2 dokud se w na vstupu nerovná w na výstupu z iterace.

Konečné hodnoty η^2 :

$$\eta^2 = \zeta^2 + \left[\frac{(v-u \cdot w)}{2} \right] + \sqrt{\left[\frac{(v-u \cdot w)}{2} \right]^2 + \zeta^2 \cdot v \cdot w} =$$

$$= 0,938 + \left[\frac{(0,001 - 0,147 \cdot 1,340)}{2} \right] + \sqrt{\left[\frac{(0,001 - 0,147 \cdot 1,340)}{2} \right]^2 + 0,938 \cdot 0,001 \cdot 1,340} = 0,942$$

Tab.4.147. Hodnoty η^2 pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **17 248.4**

P_T	0,942	P_T	0,942
P_{S1}	1,558	P_{S2}	8,410
P_T, P_{S1}	1,033	P_T, P_{S2}	0,876

Tab.4.148. Hodnoty η^2 pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **17 348.4**

P_T	0,943	P_T	0,943
P_{S1}	1,541	P_{S2}	8,410
P_T, P_{S1}	1,035	P_T, P_{S2}	0,863

Tab.4.149. Hodnoty η^2 pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **VLX 439**

P_T	0,953	P_T	0,953
P_{S1}	1,507	P_{S2}	6,262
P_T, P_{S1}	1,037	P_T, P_{S2}	0,888

Tab.4.150. Hodnoty η^2 pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **TiGr2**

P_T	0,906	P_T	0,906
P_{S1}	1,702	P_{S2}	1,675
P_T, P_{S1}	1,011	P_T, P_{S2}	0,827

Tab.4.151. Hodnoty η^2 pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **CuZn20Al2As**

P_T	0,001	P_T	0,001
P_{S1}	0,168	P_{S2}	3,791
P_T, P_{S1}	0,037	P_T, P_{S2}	-0,008

Tab.4.152. Hodnoty η^2 pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **12 021.1**

P_T	1,056	P_T	1,056
P_{S1}	1,423	P_{S2}	3,829
P_T, P_{S1}	1,105	P_T, P_{S2}	1,040

Konečné hodnoty w :

$$w = 2 \cdot \frac{\left(\frac{\eta}{\sqrt{\zeta^2}} + 1 \right)}{\left(\frac{\eta}{\sqrt{\zeta^2}} + 2 \right)} = 2 \cdot \frac{\left(\frac{1}{\sqrt{0,938}} + 1 \right)}{\left(\frac{1}{\sqrt{0,938}} + 2 \right)} = 1,340$$

Tab.4.153. Hodnoty w pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **17 248.4**

P_T	1,340	P_T	1,340
P_{S1}	1,336	P_{S2}	1,367
P_T, P_{S1}	1,348	P_T, P_{S2}	1,339

Tab.4.154. Hodnoty w pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **17 348.4**

P_T	1,340	P_T	1,340
P_{S1}	1,336	P_{S2}	1,367
P_T, P_{S1}	1,348	P_T, P_{S2}	1,338

Tab.4.155. Hodnoty w pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **VLX 439**

P_T	1,341	P_T	1,341
P_{S1}	1,336	P_{S2}	1,353
P_T, P_{S1}	1,348	P_T, P_{S2}	1,339

Tab.4.156. Hodnoty w pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **TiGr2**

P_T	1,341	P_T	1,341
P_{S1}	1,337	P_{S2}	1,334
P_T, P_{S1}	1,352	P_T, P_{S2}	1,339

Tab.4.157. Hodnoty w pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **CuZn20Al2As**

P_T	1,342	P_T	1,342
P_{S1}	1,336	P_{S2}	1,353
P_T, P_{S1}	1,350	P_T, P_{S2}	1,340

Tab.4.158. Hodnoty w pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **12 021.1**

P_T	1,342	P_T	1,342
P_{S1}	1,335	P_{S2}	1,342
P_T, P_{S1}	1,346	P_T, P_{S2}	1,341

Tlak reprezentující výslednou efektivní sílu P_Q :

$$P_Q = (P_A - P_I) \cdot \left\{ 1 - 3 \cdot \zeta^2 + 2 \cdot \left(\sqrt{\zeta^2} \right)^3 \right\} + P_I =$$

$$= (11,946 [\text{MPa}] - 1,877 [\text{MPa}]) \cdot \left\{ 1 - 3 \cdot 0,938 + 2 \cdot \left(\sqrt{0,938} \right)^3 \right\} + 1,877 [\text{MPa}] = 1,905 [\text{MPa}]$$

Tab.4.159. Hodnoty P_Q pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **17 248.4** [MPa]

P_T	1,905	P_T	1,905
P_{S1}	0,005	P_{S2}	-0,013
P_T, P_{S1}	1,649	P_T, P_{S2}	1,978

Tab.4.160. Hodnoty P_Q pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **17 348.4** [MPa]

P_T	1,903	P_T	1,904
P_{S1}	0,005	P_{S2}	-0,013
P_T, P_{S1}	1,643	P_T, P_{S2}	1,978

Tab.4.161. Hodnoty P_Q pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **VLX 439** [MPa]

P_T	1,784	P_T	1,784
P_{S1}	0,004	P_{S2}	-0,008
P_T, P_{S1}	1,531	P_T, P_{S2}	1,865

Tab.4.162. Hodnoty P_Q pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **TiGr2** [MPa]

P_T	2,049	P_T	2,049
P_{S1}	0,005	P_{S2}	-0,086
P_T, P_{S1}	1,802	P_T, P_{S2}	2,122

Tab.4.163. Hodnoty P_Q pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **CuZn20Al2As** [MPa]

P_T	1,775	P_T	1,775
P_{S1}	0,005	P_{S2}	-0,008
P_T, P_{S1}	1,534	P_T, P_{S2}	1,845

Tab.4.164. Hodnoty P_Q pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **12 021.1** [MPa]

P_T	1,422	P_T	1,422
P_{S1}	0,002	P_{S2}	-0,003
P_T, P_{S1}	1,159	P_T, P_{S2}	1,494

4.1.2.8 Okrajové ohybové momenty

Aktivní ohybový moment od zatížení ve šroubech M_A :

Celosvařovaná konstrukce bez šroubů, proto $M_A = 0\text{N}$ pro všechny varianty výměníku.

Aktivní ohybový moment od tlaku tekutiny M_B :

Pro: $b_S < 0$; $\lambda_S < 0$:

$$M_B = + \left\{ P_S \cdot (d_2 - 2 \cdot b_s) + (P_D - P_R) \frac{d_1^2}{d_2} \right\} \cdot \frac{b_s}{4} =$$

$$= + \left\{ 0 [MPa] \cdot (3037,6 [mm] - 2 \cdot (-367) [mm]) + (2,5 [MPa] - 2,5 [MPa]) \frac{2868^2 [mm^2]}{3037,6 [mm]} \right\} \cdot$$

$$\cdot \frac{(-367) [mm]}{4} = 0 [N]$$

Tab.4.165. Hodnoty M_B pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **17 248.4** [N]

P_T	0	P_T	0
P_{S1}	27165,958	P_{S2}	-6791,490
P_T, P_{S1}	27165,958	P_T, P_{S2}	-6791,490

Tab.4.166. Hodnoty M_B pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **17 348.4** [N]

P_T	0	P_T	0
P_{S1}	27165,958	P_{S2}	-6791,490
P_T, P_{S1}	27165,958	P_T, P_{S2}	-6791,490

Tab.4.167. Hodnoty M_B pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **VLX 439** [N]

P_T	0	P_T	0
P_{S1}	27165,958	P_{S2}	-6791,490
P_T, P_{S1}	27165,958	P_T, P_{S2}	-6791,490

Tab.4.168. Hodnoty M_B pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **TiGr2** [N]

P_T	0	P_T	0
P_{S1}	18546,452	P_{S2}	-4636,613
P_T, P_{S1}	18546,452	P_T, P_{S2}	-4636,613

Tab.4.169. Hodnoty M_B pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **CuZn20Al2As** [N]

P_T	0	P_T	0
P_{S1}	26873,217	P_{S2}	-6718,304
P_T, P_{S1}	26873,217	P_T, P_{S2}	-6718,304

Tab.4.170. Hodnoty M_B pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **12 021.1** [N]

P_T	0	P_T	0
P_{S1}	19174,005	P_{S2}	-4793,501
P_T, P_{S1}	19174,005	P_T, P_{S2}	-4793,501

Reakční ohybový moment od připojených komponent M_C :

Nejdříve je nutno určit hodnotu:

Skutečná šířka příruby jako části trubkovnice b_F :

$$b_F = \frac{D_{exS} - D_{vnitC}}{2} = \frac{3600 [mm] - 3035,6 [mm]}{2} = 281,8 [mm]$$

Tab.4.171. Hodnoty b_F pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	281,8	TiGr2	232,8
17 348.4	281,8	CuZn20Al2As	283,8
VLX 439	281,8	12 021.1	234,8

Pak:

Pro obě strany integrální:

$$\begin{aligned}
 M_C &= \frac{f_F \cdot e_F^2}{4} \cdot \left(\frac{2 \cdot b_F}{d_2} \right) + \frac{e_C^2}{4} \cdot \sqrt{f_C^2 - 3 \cdot \left(\frac{P_T \cdot D_{vntC}}{4 \cdot e_C} \right)^2} + \frac{e_S^2}{4} \cdot \sqrt{f_S^2 - 3 \cdot \left(\frac{P_S \cdot D_{vntS}}{4 \cdot e_S} \right)^2} = \\
 &= \frac{108 [MPa] \cdot 262^2 [mm^2]}{4} \cdot \left(\frac{2 \cdot 281,9 [mm]}{3035,6 [mm]} \right) + \\
 &+ \frac{32,2^2 [mm]}{4} \cdot \sqrt{143,333^2 [MPa] - 3 \cdot \left(\frac{2,5 [MPa] \cdot 3035,6 [mm]}{4 \cdot 32,2 [mm]} \right)^2} + \\
 &+ \frac{14,4^2 [mm]}{4} \cdot \sqrt{136,667^2 [MPa] - 3 \cdot \left(\frac{0 [MPa] \cdot 3571,2 [mm]}{4 \cdot 14,4 [mm]} \right)^2} = 511642,423 [N]
 \end{aligned}$$

Tab.4.172. Hodnoty M_C pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **17 248.4** [N]

P_T	511642,423	P_T	511642,423
P_{S1}	511268,781	P_{S2}	511620,841
P_T, P_{S1}	511267,540	P_T, P_{S2}	511619,600

Tab.4.173. Hodnoty M_C pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **17 348.4** [N]

P_T	511642,423	P_T	511642,423
P_{S1}	511268,781	P_{S2}	511620,841
P_T, P_{S1}	511267,540	P_T, P_{S2}	511619,600

Tab.4.174. Hodnoty M_C pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **VLX 439** [N]

P_T	500993,469	P_T	500993,487
P_{S1}	500619,827	P_{S2}	500971,886
P_T, P_{S1}	500618,586	P_T, P_{S2}	500970,645

Tab.4.175. Hodnoty M_C pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **TiGr2** [N]

P_T	415488,482	P_T	415488,482
P_{S1}	415156,643	P_{S2}	415469,345
P_T, P_{S1}	415155,443	P_T, P_{S2}	415468,145

Tab.4.176. Hodnoty M_C pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **CuZn20Al2As** [N]

P_T	525111,273	P_T	525111,273
P_{S1}	524693,160	P_{S2}	525087,139
P_T, P_{S1}	524691,839	P_T, P_{S2}	525085,818

Tab.4.177. Hodnoty M_C pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **12 021.1** [N]

P_T	403137,853	P_T	403137,853
P_{S1}	402719,780	P_{S2}	403113,759
P_T, P_{S1}	402718,419	P_T, P_{S2}	403112,398

Omezení reakčního ohybového momentu trubkovnicí M_D :

$$M_D = \frac{f_p \cdot e_p^2}{4} \cdot \left\{ 1 - \left(\frac{P_R \cdot d_2}{2 \cdot f_p \cdot e_p} \right)^2 \right\} =$$

$$= \frac{108 [MPa] \cdot 262^2 [mm]}{4} \cdot \left\{ 1 - \left(\frac{2,5 [MPa] \cdot 3035,6 [mm]}{2 \cdot 108 [MPa] \cdot 262 [mm]} \right)^2 \right\} = 1820058,763 [N]$$

Tab.4.178. Hodnoty M_D pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **17 248.4** [N]

P_T	1820058,763	P_T	1820058,763
P_{S1}	1853011,416	P_{S2}	1853364,464
P_T, P_{S1}	1812596,630	P_T, P_{S2}	1821806,614

Tab.4.179. Hodnoty M_D pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **17 348.4** [N]

P_T	1820058,763	P_T	1820058,763
P_{S1}	1853011,416	P_{S2}	1853364,464
P_T, P_{S1}	1812596,630	P_T, P_{S2}	1821806,614

Tab.4.180. Hodnoty M_D pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **VLX 439** [N]

P_T	17778573763	P_T	1777857,763
P_{S1}	1810874,076	P_{S2}	1811167,442
P_T, P_{S1}	1771085,884	P_T, P_{S2}	1779452,944

Tab.4.181. Hodnoty M_D pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **TiGr2** [N]

P_T	1981113,486	P_T	1981113,486
P_{S1}	2012042,331	P_{S2}	2012267,958
P_T, P_{S1}	1975395,034	P_T, P_{S2}	1982467,889

Tab.4.182. Hodnoty M_D pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **CuZn20Al2As** [N]

P_T	1773414,870	P_T	1773414,870
P_{S1}	1810769,657	P_{S2}	1811160,916
P_T, P_{S1}	1765056,763	P_T, P_{S2}	1775373,977

Tab.4.183. Hodnoty M_D pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **12 021.1** [N]

P_T	1757130,213	P_T	1757130,213
P_{S1}	1796916,862	P_{S2}	1797208,554
P_T, P_{S1}	1749754,810	P_T, P_{S2}	1758876,833

Výsledný optimální okrajový ohybový moment M_2 :Nejdříve je třeba určit M_{2max} :

$$M_{2max} = \min \{ M_A + M_B + M_C; +M_D \} = \min \{ 0 [N] + 0 [N] + 511642,423 [N]; 1820058,763 [N] \} =$$

$$= 511642,423 [N]$$

Tab.4.184. Hodnoty M_{2max} pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **17 248.4** [N]

P_T	511642,423	P_T	511642,423
P_{S1}	538434,739	P_{S2}	504829,351
P_T, P_{S1}	538433,499	P_T, P_{S2}	504828,110

Tab.4.185. Hodnoty M_{2max} pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **17 348.4** [N]

P_T	511642,423	P_T	511642,423
P_{S1}	538434,739	P_{S2}	504829,351
P_T, P_{S1}	538433,499	P_T, P_{S2}	504828,110

Tab.4.186. Hodnoty M_{2max} pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **VLX 439** [N]

P_T	500993,469	P_T	500993,469
P_{S1}	527785,785	P_{S2}	494180,367
P_T, P_{S1}	527784,544	P_T, P_{S2}	494179,156

Tab.4.187. Hodnoty M_{2max} pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **TiGr2** [N]

P_T	415488,482	P_T	415488,482
P_{S1}	433703,095	P_{S2}	410832,732
P_T, P_{S1}	433701,895	P_T, P_{S2}	410831,532

Tab.4.188. Hodnoty M_{2max} pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **CuZn20Al2As** [N]

P_T	525111,273	P_T	525111,273
P_{S1}	551566,377	P_{S2}	518368,835
P_T, P_{S1}	551565,056	P_T, P_{S2}	518367,514

Tab.4.189. Hodnoty M_{2max} pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **12 021.1** [N]

P_T	403137,853	P_T	403137,853
P_{S1}	421893,785	P_{S2}	398320,258
P_T, P_{S1}	421892,424	P_T, P_{S2}	398318,897

Pak se vypočte M_{2min} :

$$M_{2min} = \max \{M_A + M_B - M_C; -M_D\} = \min \{0[N] + 0[N] - 418834,440[N]; -2003210,666[N]\} = -418834,440[N]$$

Tab.4.190. Hodnoty M_{2min} pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **17 248.4** [N]

P_T	-511642,423	P_T	-511642,423
P_{S1}	-484102,823	P_{S2}	-518412,330
P_T, P_{S1}	-484101,582	P_T, P_{S2}	-518411,089

Tab.4.191. Hodnoty M_{2min} pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **17 348.4** [N]

P_T	-511642,423	P_T	-511642,423
P_{S1}	-484102,823	P_{S2}	-518412,330
P_T, P_{S1}	-484101,582	P_T, P_{S2}	-518411,089

Tab.4.192. Hodnoty M_{2max} pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **VLX 439** [N]

P_T	-500993,469	P_T	-500993,469
P_{S1}	-473453,869	P_{S2}	-507763,376
P_T, P_{S1}	-473452,628	P_T, P_{S2}	-507762,135

Tab.4.193. Hodnoty M_{2min} pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **TiGr2** [N]

P_T	-415488,482	P_T	-415488,482
P_{S1}	-396610,191	P_{S2}	-393006,116
P_T, P_{S1}	-396608,991	P_T, P_{S2}	-393004,916

Tab.4.194. Hodnoty M_{2min} pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **CuZn20Al2As** [N]

P_T	-525111,273	P_T	-525111,273
P_{S1}	-497819,943	P_{S2}	-531805,444
P_T, P_{S1}	-497818,622	P_T, P_{S2}	-531804,123

Tab.4.195. Hodnoty M_{2min} pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **12 021.1** [N]

P_T	-403137,853	P_T	-403137,853
P_{S1}	-383545,775	P_{S2}	-407907,260
P_T, P_{S1}	-383544,414	P_T, P_{S2}	-407905,899

Modifikovaný parametr pevnosti k_p :

$$k_p = \kappa_p \cdot (1 - \ln \eta^2) = 0,475 \cdot (1 - \ln 0,942) = 0,503$$

Tab.4.196. Hodnoty k_p pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **17 248.4**

P_T	0,503	P_T	0,503
P_{S1}	0,265	P_{S2}	-0,537
P_T, P_{S1}	0,459	P_T, P_{S2}	0,538

Tab.4.197. Hodnoty k_p pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **17 348.4**

P_T	0,503	P_T	0,503
P_{S1}	0,270	P_{S2}	-0,537
P_T, P_{S1}	0,459	P_T, P_{S2}	0,545

Tab.4.198. Hodnoty k_p pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **VLX 439**

P_T	0,498	P_T	0,498
P_{S1}	0,280	P_{S2}	-0,396
P_T, P_{S1}	0,458	P_T, P_{S2}	0,532

Tab.4.199. Hodnoty k_p pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **TiGr2**

P_T	0,513	P_T	0,513
P_{S1}	0,219	P_{S2}	0,226
P_T, P_{S1}	0,462	P_T, P_{S2}	0,556

Tab.4.200. Hodnoty k_p pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **CuZn20Al2As**

P_T	0,512	P_T	0,512
P_{S1}	0,275	P_{S2}	-0,342
P_T, P_{S1}	0,468	P_T, P_{S2}	0,552

Tab.4.201. Hodnoty k_p pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **12 021.1**

P_T	0,459	P_T	0,459
P_{S1}	0,314	P_{S2}	-0,166
P_T, P_{S1}	0,437	P_T, P_{S2}	0,467

pak:

pak se vypočte M_{2opt} :

$$M_{2opt} = \frac{-d_1^2}{8 \cdot (1 + \lambda_R)} \cdot \left\{ \frac{P_Q}{2 \cdot (2 + k_p)} + P_R \cdot \lambda_R + P_D \cdot \lambda_R^2 \cdot \left(1 + \frac{\lambda_R}{3} \right) \right\} = \frac{-2868^2 [mm^2]}{8 \cdot (1 + 0,059)} \cdot \left\{ \frac{1,906 [MPa]}{2 \cdot (2 + 0,503)} + 2,5 [MPa] \cdot 0,059 + 2,5 [MPa] \cdot 0,059^2 \cdot \left(1 + \frac{0,059}{3} \right) \right\} = -520017,956 [N]$$

Tab.4.202. Hodnoty M_{2opt} pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **17 248.4 [N]**

P_T	-520017,956	P_T	-520017,9561
P_{S1}	-14904,353	P_{S2}	7834,883
P_T, P_{S1}	-489758,421	P_T, P_{S2}	-525697,500

Tab.4.203. Hodnoty M_{2opt} pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **17 348.4 [N]**

P_T	-519701,612	P_T	-519701,612
P_{S1}	-14841,429	P_{S2}	7834,237
P_T, P_{S1}	-488603,847	P_T, P_{S2}	-524379,336

Tab.4.204. Hodnoty M_{2opt} pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **VLX 439 [N]**

P_T	-471629,623	P_T	-471629,623
P_{S1}	-10088,219	P_{S2}	4731,145
P_T, P_{S1}	-434134,916	P_T, P_{S2}	-480836,364

Tab.4.205. Hodnoty M_{2opt} pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **TiGr2 [N]**

P_T	-494556,894	P_T	-494556,894
P_{S1}	-9520,712	P_{S2}	20424,547
P_T, P_{S1}	-463606,959	P_T, P_{S2}	-499644,729

Tab.4.206. Hodnoty M_{2opt} pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **CuZn20Al2As [N]**

P_T	-571362,466	P_T	-571362,466
P_{S1}	-18160,665	P_{S2}	6755,606
P_T, P_{S1}	-542558,358	P_T, P_{S2}	-576071,628

Tab.4.207. Hodnoty M_{2opt} pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **12 021.1** [N]

P_T	-527217,870	P_T	-527218,359
P_{S1}	-14763,012	P_{S2}	4440,603
P_T, P_{S1}	-481937,315	P_T, P_{S2}	-539393,524

Konečně M_2 :

$$M_2 = \max \left\{ M_{2min}; \min \left(M_{2opt}; M_{2max} \right) \right\} =$$

$$= \max \left\{ -511642,423[N]; \min \left(-520017,956[N]; 511642,423[N] \right) \right\} = -511642,423[N]$$

Tab.4.208. Hodnoty M_2 pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **17 248.4** [N]

P_T	-511642,423	P_T	-511642,423
P_{S1}	-14904,353	P_{S2}	7834,883
P_T, P_{S1}	-484101,582	P_T, P_{S2}	-518411,089

Tab.4.209. Hodnoty M_2 pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **17 348.4** [N]

P_T	-511642,423	P_T	-511642,423
P_{S1}	-14841,429	P_{S2}	7834,237
P_T, P_{S1}	-488603,847	P_T, P_{S2}	-524379,336

Tab.4.210. Hodnoty M_2 pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **VLX 439** [N]

P_T	-471629,623	P_T	-471629,623
P_{S1}	-10088,219	P_{S2}	4731,145
P_T, P_{S1}	-434134,916	P_T, P_{S2}	-480836,364

Tab.4.211. Hodnoty M_2 pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **TiGr2** [N]

P_T	-415488,482	P_T	-388614,740
P_{S1}	-9520,712	P_{S2}	20424,547
P_T, P_{S1}	-396608,991	P_T, P_{S2}	-420104,758

Tab.4.212. Hodnoty M_2 pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **CuZn20Al2As** [N]

P_T	-525111,273	P_T	-525111,273
P_{S1}	-18160,665	P_{S2}	6755,606
P_T, P_{S1}	-497818,622	P_T, P_{S2}	-531804,123

Tab.4.213. Hodnoty M_2 pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **12 021.1** [N]

P_T	-403137,853	P_T	-403137,853
P_{S1}	-14763,012	P_{S2}	4440,603
P_T, P_{S1}	-383544,4135	P_T, P_{S2}	-407905,899

Tlak reprezentující moment P_M :

$$P_M = M_2 \cdot 8 \cdot \frac{(1 + \lambda_R)}{d_1^2} + P_R \cdot \lambda_R + P_D \cdot \lambda_R^2 \cdot \left(1 + \frac{\lambda_R}{3} \right) = -511642,423[N] \cdot 8 \cdot \frac{(1 + 0,059)}{2868^2 [mm^2]} +$$

$$+ 2,5 [MPa] \cdot 0,059 + 2,5 [MPa] \cdot 0,059^2 \cdot \left(1 + \frac{0,059}{3} \right) = -0,372 [MPa]$$

Tab.4.214. Hodnoty P_M pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **17 248.4** [MPa]

P_T	-0,372	P_T	-0,372
P_{S1}	-0,001	P_{S2}	0,005
P_T, P_{S1}	-0,329	P_T, P_{S2}	-0,382

Tab.4.215. Hodnoty P_M pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **17 348.4** [MPa]

P_T	-0,372	P_T	-0,372
P_{S1}	-0,001	P_{S2}	0,005
P_T, P_{S1}	-0,329	P_T, P_{S2}	-0,382

Tab.4.216. Hodnoty P_M pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **VLX 439** [MPa]

P_T	-0,357	P_T	-0,357
P_{S1}	-0,001	P_{S2}	0,002
P_T, P_{S1}	-0,312	P_T, P_{S2}	-0,368

Tab.4.217. Hodnoty P_M pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **TiGr2** [MPa]

P_T	-0,324	P_T	-0,324
P_{S1}	-0,001	P_{S2}	0,019
P_T, P_{S1}	-0,295	P_T, P_{S2}	-0,331

Tab.4.218. Hodnoty P_M pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **CuZn20Al2As** [MPa]

P_T	-0,310	P_T	-0,310
P_{S1}	-0,001	P_{S2}	0,002
P_T, P_{S1}	-0,269	P_T, P_{S2}	-0,320

Tab.4.219. Hodnoty P_M pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **12 021.1** [MPa]

P_T	-0,182	P_T	-0,182
P_{S1}	-0,001	P_{S2}	0,001
P_T, P_{S1}	-0,152	P_T, P_{S2}	-0,189

4.1.2.9 Podmínky mezního zatížení

a) Ohyb v otrubkované oblasti

Hodnota L_I :

$$L_I = \frac{3 \cdot |P_Q|}{(2 + k_p) \cdot \varphi_p} = \frac{3 \cdot 1,905 [MPa]}{(2 + 0,502) \cdot 0,344} = 6,636 [MPa]$$

Tab.4.220. Hodnoty L_I pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **17 248.4** [MPa]

P_T	6,636	P_T	6,636
P_{S1}	0,021	P_{S2}	0,079
P_T, P_{S1}	5,846	P_T, P_{S2}	6,799

Tab.4.221. Hodnoty L_I pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **17 348.4** [MPa]

P_T	6,630	P_T	6,630
P_{S1}	0,020	P_{S2}	0,079
P_T, P_{S1}	5,825	P_T, P_{S2}	6,775

Tab.4.222. Hodnoty L_I pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **VLX 439** [MPa]

P_T	6,227	P_T	6,227
P_{S1}	0,015	P_{S2}	0,041
P_T, P_{S1}	5,433	P_T, P_{S2}	6,422

Tab.4.223. Hodnoty L_I pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **TiGr2** [MPa]

P_T	7,592	P_T	7,592
P_{S1}	0,022	P_{S2}	0,361
P_T, P_{S1}	6,817	P_T, P_{S2}	7,733

Tab.4.224. Hodnoty L_I pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **CuZn20Al2As** [MPa]

P_T	5,956	P_T	5,956
P_{S1}	0,020	P_{S2}	0,040
P_T, P_{S1}	5,240	P_T, P_{S2}	6,096

Tab.4.225. Hodnoty L_I pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **12 021.1** [MPa]

P_T	4,556	P_T	4,556
P_{S1}	0,008	P_{S2}	0,012
P_T, P_{S1}	3,745	P_T, P_{S2}	4,771

Hodnota L_2 :

$$L_2 = \frac{3 \cdot (|P_Q + P_M \cdot (2 - \lambda_R)| + |P_M \cdot \lambda_R|)}{(1 + k_p) \cdot \varphi_p + \lambda_R} =$$

$$= \frac{3 \cdot (|1,905 [MPa] - 0,372 [MPa] \cdot (2 - 0,059)| + |-0,372 [MPa] \cdot 0,059|)}{(1 + 0,502) \cdot 0,344 + 0,059} = 6,278 [MPa]$$

Tab.4.226. Hodnoty L_2 pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **17 248.4** [MPa]

P_T	6,278	P_T	6,278
P_{S1}	0,019	P_{S2}	0,065
P_T, P_{S1}	5,915	P_T, P_{S2}	6,884

Tab.4.227. Hodnoty L_2 pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **17 348.4** [MPa]

P_T	6,270	P_T	6,270
P_{S1}	0,018	P_{S2}	0,065
P_T, P_{S1}	5,881	P_T, P_{S2}	6,845

Tab.4.228. Hodnoty L_2 pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **VLX 439** [MPa]

P_T	5,935	P_T	5,935
P_{S1}	0,015	P_{S2}	0,037
P_T, P_{S1}	5,433	P_T, P_{S2}	6,422

Tab.4.229. Hodnoty L_2 pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **TiGr2** [MPa]

P_T	8,067	P_T	5,881
P_{S1}	0,021	P_{S2}	0,317
P_T, P_{S1}	7,719	P_T, P_{S2}	7,009

Tab.4.230. Hodnoty L_2 pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **CuZn20Al2As** [MPa]

P_T	5,931	P_T	5,931
P_{S1}	0,018	P_{S2}	0,034
P_T, P_{S1}	5,717	P_T, P_{S2}	6,543

Tab.4.231. Hodnoty L_2 pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **12 021.1** [MPa]

P_T	5,246	P_T	5,246
P_{S1}	0,008	P_{S2}	0,011
P_T, P_{S1}	4,680	P_T, P_{S2}	5,995

Hodnota L_3 :

$$L_3 = \frac{|P_Q| + |P_Q + P_M \cdot 6|}{\varphi_P + \lambda_R} = \frac{1,905[MPa] + |1,905[MPa] - 0,372[MPa] \cdot 6|}{0,344 + 0,059} = 5,544[MPa]$$

Tab.4.232. Hodnoty L_3 pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **17 248.4** [MPa]

P_T	5,544	P_T	5,544
P_{S1}	0,018	P_{S2}	0,070
P_T, P_{S1}	5,744	P_T, P_{S2}	6,668

Tab.4.233. Hodnoty L_3 pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **17 348.4** [MPa]

P_T	5,544	P_T	5,544
P_{S1}	0,017	P_{S2}	0,068
P_T, P_{S1}	5,744	P_T, P_{S2}	6,668

Tab.4.234. Hodnoty L_3 pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **VLX 439** [MPa]

P_T	5,584	P_T	5,584
P_{S1}	0,014	P_{S2}	0,037
P_T, P_{S1}	5,433	P_T, P_{S2}	6,422

Tab.4.235. Hodnoty L_3 pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **TiGr2** [MPa]

P_T	5,881	P_T	5,881
P_{S1}	0,019	P_{S2}	0,317
P_T, P_{S1}	5,691	P_T, P_{S2}	7,009

Tab.4.236. Hodnoty L_3 pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **CuZn20Al2As** [MPa]

P_T	4,406	P_T	4,406
P_{S1}	0,017	P_{S2}	0,033
P_T, P_{S1}	4,539	P_T, P_{S2}	5,402

Tab.4.237. Hodnoty L_3 pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **12 021.1** [MPa]

P_T	3,953	P_T	3,953
P_{S1}	0,007	P_{S2}	0,011
P_T, P_{S1}	3,684	P_T, P_{S2}	4,871

Poměr zatížení pro ohyb Φ_B :

$$\Phi_B = \max(L_1; L_2; L_3) \cdot \frac{d_1^2}{12 \cdot f_p \cdot e_p} =$$

$$= \max(6,636[MPa]; 6,278[MPa]; 5,544[MPa]) \cdot \frac{2868^2[mm^2]}{12 \cdot 108[MPa] \cdot 262[mm]} =$$

$$= 0,614 \leq 1 \quad \text{VYHOVUJE}$$

Tab.4.238. Hodnoty Φ_B pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **17 248.4**

P_T	0,614	P_T	0,614
P_{S1}	0,002	P_{S2}	0,007
P_T, P_{S1}	0,547	P_T, P_{S2}	0,637

Tab.4.239. Hodnoty Φ_B pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **17 348.4**

P_T	0,613	P_T	0,613
P_{S1}	0,002	P_{S2}	0,007
P_T, P_{S1}	0,544	P_T, P_{S2}	0,633

Tab.4.240. Hodnoty Φ_B pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **VLX 439**

P_T	0,611	P_T	0,611
P_{S1}	0,002	P_{S2}	0,004
P_T, P_{S1}	0,533	P_T, P_{S2}	0,630

Tab.4.241. Hodnoty Φ_B pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **TiGr2**

P_T	0,660	P_T	0,660
P_{S1}	0,002	P_{S2}	0,030
P_T, P_{S1}	0,632	P_T, P_{S2}	0,715

Tab.4.242. Hodnoty Φ_B pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **CuZn20Al2As**

P_T	0,629	P_T	0,629
P_{S1}	0,002	P_{S2}	0,004
P_T, P_{S1}	0,604	P_T, P_{S2}	0,691

Tab.4.243. Hodnoty Φ_B pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **12 021.1 [MPa]**

P_T	0,597	P_T	0,597
P_{S1}	0,001	P_{S2}	0,001
P_T, P_{S1}	0,532	P_T, P_{S2}	0,682

Podmínky Φ_B vyhovují trubkovnice všech variant výměníku.

b) Smyk na okraji otrubkované oblasti

$$\Phi_B = \frac{P_R \cdot d_1}{2 \cdot \varphi_p \cdot f_p \cdot e_p} = \frac{2,5[MPa] \cdot 2868[mm]}{2 \cdot 0,344 \cdot 108[MPa] \cdot 262[mm]} = 0,368 \leq 1 \quad \text{VYHOVUJE}$$

Tab.4.244. Hodnoty Φ_B pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **17 248.4**

P_T	0,368	P_T	0,368
P_{S1}	0,039	P_{S2}	0,010
P_T, P_{S1}	0,407	P_T, P_{S2}	0,358

Tab.4.245. Hodnoty Φ_B pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **17 348.4**

P_T	0,368	P_T	0,368
P_{S1}	0,039	P_{S2}	0,010
P_T, P_{S1}	0,407	P_T, P_{S2}	0,358

Tab.4.246. Hodnoty Φ_B pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **VLX 439**

P_T	0,379	P_T	0,379
P_{S1}	0,037	P_{S2}	0,009
P_T, P_{S1}	0,416	P_T, P_{S2}	0,370

Tab.4.247. Hodnoty Φ_B pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **TiGr2**

P_T	0,370	P_T	0,307
P_{S1}	0,033	P_{S2}	0,008
P_T, P_{S1}	0,403	P_T, P_{S2}	0,362

Tab.4.248. Hodnoty Φ_B pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **CuZn20Al2As**

P_T	0,380	P_T	0,380
P_{S1}	0,040	P_{S2}	0,010
P_T, P_{S1}	0,420	P_T, P_{S2}	0,370

Tab.4.249. Hodnoty Φ_B pro všechny zatěžující stavy trubkovnice, varianta výměníku **12 021.1** [MPa]

P_T	0,369	P_T	0,369
P_{S1}	0,032	P_{S2}	0,008
P_T, P_{S1}	0,401	P_T, P_{S2}	0,361

Podmínce Φ_B vyhovují trubkovnice všech variant výměníku.

c) Dodatečný vliv hmotnosti

$$\frac{e_P}{d_2} \geq 0,02$$

$$\frac{262[mm]}{3035,6[mm]} = 0,086 \geq 0,02 \quad \text{VYHOVUJE}$$

Tab.4.250. Hodnoty e_P/d_2 pro všechny varianty výměníku

17 248.4	0,086	TiGr2	0,093
17 348.4	0,086	CuZn20Al2As	0,080
VLX 439	0,085	12 021.1	0,077

Podmínce vyhovují trubkovnice všech variant výměníku.

Kontrolované tloušťky trubkovnic e_F viz. tab.4.2 **VYHOVUJÍ** provoznímu zatížení. Ve výsledcích podmínek mezního zatížení Φ_B jsou patrné drobné rezervy, ty se mohou zmenšit snížením tloušťky trubkovnice e_F avšak z důvodu nedořešení dimenzování parního pláště vlivem absence vstupního hrdla pro páru a také s neuvažováním vyššího zatížení při tlakové zkoušce se mohou tyto provizorní výsledky pokládat za konečné.

4.2 Plášť vodní komory

dle: ČSN EN 13445 – 3 – 7.4. , 9.4.

4.2.1 Vlastnosti materiálu, volba základních rozměrů komponenty

Materiál pláště vodní komory: P265GH EN 10028 – 2 (výp. teplota $t_T = 150^\circ\text{C}$)

Průměrná tloušťka pláště vodní komory e_C : $e_C = 34 \text{ mm}$

Tab.4.251. Hodnoty e_C pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	34	TiGr2	34
17 348.4	34	CuZn20Al2As	36
VLX 439	34	12 021.1	37

Mez kluzu R_{eHC} pro tloušťku výrobku $16 < t \leq 40 \text{ mm}$ z tabulek: $R_{eHC} = 255 \text{ MPa}$

Hodnoty R_{eHC} pláště vodní komory jsou pro ostatní varianty výměníku stejné.

Mez pevnosti v tahu R_{mC} pro tloušťku výrobku $16 < t \leq 40 \text{ mm}$ z tabulek: $R_{mC} = 410 \text{ MPa}$

Hodnoty R_{mC} pláště vodní komory jsou pro ostatní varianty výměníku stejné.

Minimální hodnota meze kluzu 0,2% $R_{p0,2tC}$ pro teplotu $t_T = 150^\circ\text{C}$ a tloušťku výrobku $16 < t \leq 40 \text{ mm}$ z tabulek:

$R_{p0,2tC} = 215 \text{ MPa}$

Hodnoty $R_{p0,2tC}$ pláště vodní komory jsou pro ostatní varianty výměníku stejné.

Dolní úchylka tloušťky δ_C : $\delta_C = 0,8 \text{ mm}$

Hodnoty δ_C pláště vodní komory jsou pro ostatní varianty výměníku stejné.

Vnější průměr pláště D_{exC} : $D_{exC} = 3100 \text{ mm}$

Tab.4.252. Hodnoty D_{exC} pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	3100	TiGr2	3000
17 348.4	3100	CuZn20Al2As	3300
VLX 439	3100	12 021.1	3400

Úbytek koroze pláště c_C : $c_C = 1 \text{ mm}$

Hodnoty c_C pláště vodní komory jsou pro ostatní varianty výměníku stejné.

Analýzovaná tloušťka pláště e_C : $e_C = e_{Cav} - c_C - \delta_C = 34[mm] - 1[mm] - 0,8[mm] = 32,2[mm]$

Tab.4.253. Hodnoty e_C pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	32,2	TiGr2	32,2
17 348.4	32,2	CuZn20Al2As	34,2
VLX 439	32,2	12 021.1	35,2

Vnitřní průměr pláště D_{vnitC} : $D_{vnitC} = D_{exC} - 2 \cdot e_C = 3100[mm] - 2 \cdot 32,2[mm] = 3035,6[mm]$

Tab.4.254. Hodnoty D_{vnitC} pro všechny materiály [mm]

17 248.4	3035,6	TiGr2	2933,6
17 348.4	3035,6	CuZn20Al2As	3231,6
VLX 439	3035,6	12 021.1	3329,6

Dovolené namáhání komory f_C :

$$f_C = \text{menší } z \left(\frac{R_{p0,2C}}{1,5} < \frac{R_{mC}}{2,4} \right) = \text{menší } z \left(\frac{215[MPa]}{1,5} < \frac{410[MPa]}{2,4} \right) = 143,333[MPa]$$

Hodnoty f_C pláště vodní komory jsou pro ostatní varianty výměníku stejné.

Dovolené namáhání komory při okolní teplotě f_{C20} :

$$f_{C20} = \text{menší } z \left(\frac{R_{p0,2C}}{1,5} < \frac{R_{mC}}{2,4} \right) = \text{menší } z \left(\frac{255[MPa]}{1,5} < \frac{410[MPa]}{2,4} \right) = 170[MPa]$$

Hodnoty f_{C20} pláště vodní komory jsou pro ostatní varianty výměníku stejné.

4.2.2 Výpočet

4.2.2.1 Zatížení vnitřním tlakem

Všechny parametry budou vypočteny detailně pro variantu 17 248.4, pro ostatní budou uvedeny výsledky v tabulce.

Požadovaná tloušťka stěny e :

$$e = \frac{P_T \cdot D_{exC}}{2 \cdot f_C \cdot z + P_T} = \frac{2,5[MPa] \cdot 3100[mm]}{2 \cdot 143,333[MPa] \cdot 0,85 + 2,5[MPa]} = 31,483[mm]$$

Tab.4.255. Hodnoty e pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	31,483	TiGr2	30,467
17 348.4	31,483	CuZn20Al2As	33,514
VLX 439	31,483	12 021.1	34,529

Využití e/e_{Cav} :

$$\frac{e}{e_{Cav}} = \frac{31,483[mm]}{34[mm]} = 0,926 \leq 1 \quad \text{VYHOVUJE}$$

Tab.4.256. Hodnoty e/e_{cav} pro všechny varianty výměníku

17 248.4	0,926	TiGr2	0,896
17 348.4	0,926	CuZn20Al2As	0,931
VLX 439	0,926	12 021.1	0,933

Střední průměr pláště D_m :

$$D_m = \frac{D_{exc} + D_{vnitC}}{2} = \frac{3100[mm] + 3035,6[mm]}{2} = 3067,8[mm]$$

Tab.4.257. Hodnoty D_m pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	3067,8	TiGr2	2967,8
17 348.4	3067,8	CuZn20Al2As	3265,8
VLX 439	3067,8	12 021.1	3364,8

Korozní stav a výpočtová teplota

$$P_{max} \geq P_T$$

$$P_{max} = \frac{2 \cdot fC_s \cdot z \cdot e_c}{D_m} =$$

$$= \frac{2 \cdot 143,333[MPa] \cdot 0,85 \cdot 32,2[mm]}{3067,8[mm]} = 2,558[MPa] \geq 2,5[MPa] \quad \text{VYHOVUJE}$$

Tab.4.258. Hodnoty P_{max} pro všechny varianty výměníku [MPa]

17 248.4	2,558	TiGr2	2,644
17 348.4	2,558	CuZn20Al2As	2,552
VLX 439	2,558	12 021.1	2,558

Nekorozní stav a okolní teplota

$$P_{max20} \geq P_T$$

$$P_{max20} = \frac{2 \cdot f_{C20} \cdot z \cdot (e_c + c_c)}{D_m} =$$

$$= \frac{2 \cdot 170[MPa] \cdot 0,85 \cdot (32,2[mm] + 1[mm])}{3067,8[mm]} = 3,128[MPa] \geq 2,5[MPa] \quad \text{VYHOVUJE}$$

Tab.4.259. Hodnoty P_{max20} pro všechny varianty výměníku [MPa]

17 248.4	3,128	TiGr2	3,233
17 348.4	3,128	CuZn20Al2As	3,115
VLX 439	3,128	12 021.1	3,109

Podmínka platnosti

$$\frac{e}{D} \leq 0,16$$

$$\frac{31,483[mm]}{3100[mm]} \leq 0,16$$

$$0,010 \leq 0,16 \quad \text{VYHOVUJE}$$

Tab.4.260. Hodnoty e/D pro všechny varianty výměníku

17 248.4	0,010	TiGr2	0,010
17 348.4	0,010	CuZn20Al2As	0,010
VLX 439	0,010	12 021.1	0,010

Otvory v blízkosti diskontinuitPoloměr vnitřní stěny skořepiny r_{is} :

$$r_{is} = \frac{D_{exc}}{2} - e_c = \frac{3100[mm]}{2} - 32,2[mm] = 1517,8[mm]$$

Tab.4.261. Hodnoty r_{is} pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	1517,8	TiGr2	1467,8
17 348.4	1517,8	CuZn20Al2As	1615,8
VLX 439	1517,8	12 021.1	1615,8

Minimální vzdálenost otvoru od diskontinuit w_{min} :

$$w_{min} = \max \left[0, 2 \cdot \sqrt{(2 \cdot r_{is} + e_c) \cdot e_c}; 3 \cdot e_c \right] =$$

$$= \max \left[0, 2 \cdot \sqrt{(2 \cdot 1517,8[mm] + 32,2[mm]) \cdot 32,2[mm]}; 3 \cdot 32,2[mm] \right] = 96,6[mm]$$

Tab.4.262. Hodnoty w_{min} pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	96,6	TiGr2	96,6
17 348.4	96,6	CuZn20Al2As	102,6
VLX 439	96,6	12 021.1	105,6

Tloušťka stěny pláště vodní komory viz.Tab.4.251. **VYHOVUJE** zatížení vnitřním tlakem.**4.2.2.2 Nevzdušené otvory**Průměr nevzdušeného otvoru d :**Tab.4.263.** Hodnoty d pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	120	TiGr2	120
17 348.4	120	CuZn20Al2As	120
VLX 439	120	12 021.1	120

Parametr l_{so} :

$$l_{so} = \sqrt{(r_{is} + e_c) \cdot e_c} = \sqrt{(1517,8[mm] + 32,2[mm]) \cdot 32,2[mm]} = 314,299[mm]$$

Tab.4.264. Hodnoty l_{so} pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	314,299	TiGr2	309,133
17 348.4	314,299	CuZn20Al2As	334,201
VLX 439	314,299	12 021.1	344,153

Podélný řezParametr a :

$$a = 0,5 \cdot d = 0,5 \cdot 120 [mm] = 60 [mm]$$

Tab.4.265. Hodnoty a pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	60	TiGr2	60
17 348.4	60	CuZn20Al2As	60
VLX 439	60	12 021.1	60

Plocha Ap_{sp} :

$$Ap_{sp} = r_{is} \cdot (l_{so} + a) = 1517,8 [mm] \cdot (314,299 [mm] + 60 [mm]) = 568109,329 [mm^2]$$

Tab.4.266. Hodnoty Ap_{sp} pro všechny varianty výměníku [mm²]

17 248.4	568109,329	TiGr2	541813,295
17 348.4	568109,329	CuZn20Al2As	636950,101
VLX 439	568109,329	12 021.1	672833,122

Příčný řezParametr r_{ms} :

$$r_{ms} = r_{is} + 0,5 \cdot e_c = 1517,8 [mm] + 0,5 \cdot 32,2 [mm] = 1533,9 [mm]$$

Tab.4.267. Hodnoty r_{ms} pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	1533,9	TiGr2	1483,9
17 348.4	1533,9	CuZn20Al2As	1632,9
VLX 439	1533,9	12 021.1	1682,4

Parametr δ :

$$\delta = \frac{d}{2 \cdot r_{ms}} = \frac{120 [mm]}{2 \cdot 1533,9 [mm]} = 0,039$$

Tab.4.268. Hodnoty δ pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	0,039	TiGr2	0,040
17 348.4	0,039	CuZn20Al2As	0,037
VLX 439	0,039	12 021.1	0,036

Parametr a_p :

$$a_p = r_{mC} \cdot \arcsin(\delta) = 1533,9 [mm] \cdot \arcsin(0,039) = 60,015 [mm]$$

Tab.4.269. Hodnoty a_p pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	60,015	TiGr2	60,016
17 348.4	60,015	CuZn20Al2As	60,014
VLX 439	60,015	12 021.1	60,013

Plocha $Ap_{spř}$:

$$Ap_{spř} = 0,5 \cdot r_{is}^2 \cdot \frac{l_{so} + a_p}{0,5 \cdot e_c + r_{is}} = 0,5 \cdot 1517,8^2 [mm^2] \cdot \frac{314,298 [mm] + 60,015 [mm]}{0,5 \cdot 32,2 [mm] + 1517,8 [mm]} = 281084,690 [mm^2]$$

Tab.4.270. Hodnoty $Ap_{spř}$ pro všechny varianty výměníku [mm²]

17 248.4	281084,690	TiGr2	267979,245
17 348.4	281084,690	CuZn20Al2As	315150,727
VLX 439	281084,690	12 021.1	332907,707

Plocha Ap_s :

$$Ap_s = \max(Ap_{sp}; Ap_{spř}) = \max(568109,329[mm^2]; 281084,690[mm^2]) = 568109,329[mm^2]$$

Tab.4.271. Hodnoty Ap_s pro všechny varianty výměníku [mm²]

17 248.4	568109,329	TiGr2	541813,295
17 348.4	568109,329	CuZn20Al2As	636950,101
VLX 439	568109,329	12 021.1	672833,122

Plocha Af_s :

$$Af_s = l_{so} \cdot e_c = 314,298[mm] \cdot 32,2[mm] = 10120,392[mm^2]$$

Tab.4.272. Hodnoty Af_s pro všechny varianty výměníku [mm²]

17 248.4	10120,392	TiGr2	9954,080
17 348.4	10120,392	CuZn20Al2As	11429,677
VLX 439	10120,392	12 021.1	12114,169

Plocha Ap_b :

$$Ap_b = \frac{d}{2} \cdot e_s = \frac{120[mm]}{2} \cdot 32,2[mm] = 1932[mm^2]$$

Tab.4.273. Hodnoty Ap_b pro všechny varianty výměníku [mm²]

17 248.4	1932	TiGr2	1932
17 348.4	1932	CuZn20Al2As	2052
VLX 439	1932	12 021.1	2112

Další potřebné parametry:

Platí pro všechny varianty výměníku:

$Af_b = 0 [mm^2]$	napětím zatížená plocha zapuštěného hrdla
$Ap_\varphi = 0 [mm^2]$	tlakem zatížená plocha vlivem šikmě umístěného hrdla pod úhlem φ
$Af_p = 0 [mm^2]$	napětím zatížená plocha vyztužujícího límce
$Af_w = 0 [mm^2]$	napětím zatížená plocha svaru

$f_b = 0 [MPa]$	maximální dovolené napětí materiálu hrdla
$f_p = 0 [MPa]$	maximální dovolené napětí materiálu límce

podmínka:

$$f_b \leq f_c \quad 0[MPa] \leq 143,333[MPa] \quad \text{VYHOVUJE}$$

$$f_p \leq f_c \quad 0[MPa] \leq 143,333[MPa] \quad \text{VYHOVUJE}$$

Tato podmínka je splněna pro pláště všech variant výměníku.

Provozní stav:Zatížení A_1 :

$$A_1 = (Af_c + Af_w) \cdot (f_c - 0,5 \cdot P_T) + Af_p \cdot (f_p - 0,5 \cdot P_T) + Af_b \cdot (f_b - 0,5 \cdot P_T) =$$

$$= (10120,392 [mm^2] + 0 [mm^2]) \cdot (143,333 [MPa] - 0,5 \cdot 2,5 [MPa]) +$$

$$+ 0 [mm^2] \cdot (0 [MPa] - 0,5 \cdot 2,5 [MPa]) + 0 [mm^2] \cdot (0 [MPa] - 0,5 \cdot 2,5 [MPa]) = 1437939,012 [N]$$

Tab.4.274. Hodnoty A_1 pro všechny varianty výměníku [N]

17 248.4	1437939,012	TiGr2	1414308,854
17 348.4	1437939,012	CuZn20Al2As	1623966,584
VLX 439	1437939,012	12 021.1	1721221,492

Zatížení A_2 :

$$A_2 = P_T \cdot (Ap_s + Ap_b + 0,5 \cdot Ap_\phi) =$$

$$= 2,5 [MPa] \cdot (568109,329 [mm^2] + 1932 [mm^2] + 0,5 \cdot 0 [mm^2]) = 1425103,322 [N]$$

Tab.4.275. Hodnoty A_2 pro všechny varianty výměníku [N]

17 248.4	1425103,322	TiGr2	1359363,237
17 348.4	1425103,322	CuZn20Al2As	1597505,251
VLX 439	1425103,322	12 021.1	1687362,806

Využití:

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{1425103,322}{1437939,012} = 0,991 \leq 1 \quad \text{VYHOVUJE}$$

Tab.4.276. Hodnoty A_2 / A_1 pro všechny varianty výměníku [N]

17 248.4	0,991	TiGr2	0,961
17 348.4	0,991	CuZn20Al2As	0,984
VLX 439	0,991	12 021.1	0,980

Stav při $t = 20^\circ\text{C}$:Zatížení A_1 :

$$A_1 = (Af_c + Af_w) \cdot (f_{c20} - 0,5 \cdot P_T) + Af_p \cdot (f_p - 0,5 \cdot P_T) + Af_b \cdot (f_b - 0,5 \cdot P_T) =$$

$$= (10120,392 [mm^2] + 0 [mm^2]) \cdot (170 [MPa] - 0,5 \cdot 2,5 [MPa]) +$$

$$+ 0 [mm^2] \cdot (0 [MPa] - 0,5 \cdot 2,5 [MPa]) + 0 [mm^2] \cdot (0 [MPa] - 0,5 \cdot 2,5 [MPa]) = 1707816,128 [N]$$

Tab.4.277. Hodnoty A_1 pro všechny varianty výměníku [N]

17 248.4	1707816,128	TiGr2	1679750,984
17 348.4	1707816,128	CuZn20Al2As	1928757,967
VLX 439	1707816,128	12 021.1	2044265,994

Zatížení A_2 :

$$A_2 = P_T \cdot (Ap_s + Ap_b + 0,5 \cdot Ap_\phi) =$$

$$= 2,5 [MPa] \cdot (568109,323 [mm^2] + 1932 [mm^2] + 0,5 \cdot 0 [mm^2]) = 1425103,322 [N]$$

Tab.4.278. Hodnoty A_2 pro všechny varianty výměníku [N]

17 248.4	1425103,322	TiGr2	1359363,237
17 348.4	1425103,322	CuZn20Al2As	1597505,251
VLX 439	1425103,322	12 021.1	1687362,806

Využití:

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{1425103,322}{1707816,128} = 0,834 \leq 1 \quad \text{VYHOVUJE}$$

Tab.4.279. Hodnoty A_2 / A_1 pro všechny varianty výměníku [N]

17 248.4	0,834	TiGr2	0,809
17 348.4	0,834	CuZn20Al2As	0,828
VLX 439	0,834	12 021.1	0,825

Nevyztužený otvor o maximálním průměru d viz. Tab.4.263. **VYHOVUJE.**

Maximální rozměr nevyztuženého otvoru v plášti vodní komory $d = 120\text{mm}$ **NEVYHOVUJE** rozměrům vstupního / výstupního hrdla DN 1200. Je nutné provést vyztužení otvoru vsazeným hrdlem.

4.2.3 Vyztužení otvoru vsazeným hrdlem a výztužným límcem

Materiál pláště hrdla: P265GH EN 10028 – 2 (výp. teplota $t_T = 150^\circ\text{C}$)

Mez kluzu R_{eH} pro tloušťku výrobku $16 < t \leq 40\text{ mm}$ z tabulek: $R_{eH} = 255\text{ MPa}$

Minimální hodnota meze kluzu 0,2% $R_{p0,2t}$ pro teplotu $t_T = 150^\circ\text{C}$ a tloušťku výrobku $16 < t \leq 40\text{ mm}$ z tabulek:

$$R_{p0,2t} = 215\text{ MPa}$$

Mez pevnosti v tahu R_m pro tloušťku výrobku $16 < t \leq 40\text{ mm}$ z tabulek: $R_m = 410\text{ MPa}$

Modul pružnosti E pro teplotu $t_T = 150^\circ\text{C}$ z tabulek: $E = 196000\text{ MPa}$

Průměrná tloušťka pláště hrdla v místě spoje e_{bav} : $e_{bav} = 24\text{ mm}$

Poissonova konstanta pro plášť hrdla ν : $\nu = 0,3$

Vnější průměr pláště D_{exb} : $D_{exb} = 1248\text{ mm}$

Úbytek koroze pláště hrdla c_b : $c_b = 1\text{ mm}$

Dolní úchylka tloušťky δ_b : $\delta_b = 0,6\text{ mm}$

Analyzovaná tloušťka pláště e_b :

$$e_b = e_{bav} - c_b - \delta_b = 24[\text{mm}] - 1[\text{mm}] - 0,6[\text{mm}] = 22,4[\text{mm}]$$

Vnitřní průměr pláště D_{vnitb} :

$$D_{vnitb} = D_{exb} - 2 \cdot e_b = 1248[\text{mm}] - 2 \cdot 22,4[\text{mm}] = 1203,2[\text{mm}]$$

Dovolená namáhání pláště hrdla f_b :

$$f_b = \text{menší } z \left(\frac{R_{p0,2}}{1,5} < \frac{R_m}{2,4} \right) = \text{menší } z \left(\frac{215[MPa]}{1,5} < \frac{410[MPa]}{2,4} \right) = 143,333[MPa]$$

Dovolená namáhání pláště pro okolní teplotu f_{b20} :

$$f_{b20} = \text{menší } z \left(\frac{R_{eH}}{1,5} < \frac{R_m}{2,4} \right) = \text{menší } z \left(\frac{255[MPa]}{1,5} < \frac{410[MPa]}{2,4} \right) = 170[MPa]$$

Součinitel z : $z = 1\text{mm}$

Délka vnější části hrdla skořepiny l_b : $l_b = 180\text{mm}$

Délka vnitřní části hrdla l_{bi} : $l_{bi} = 20\text{mm}$

Vzdálenost mezi otvorem a diskontinuitou skořepiny w : $w = 300\text{mm}$

Vyztužující tloušťka stěny komory v okolí otvoru e_{Cs} : $e_{Cs} = 15\text{mm}$

Analyzovaná tloušťka pláště v místě vyztužení e_{Ca} :

$$e_{Ca} = e_c + e_{Cs} = 32,2[mm] + 15[mm] = 47,2[mm]$$

Tab.4.280. Hodnoty e_{Ca} pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	47,2	TiGr2	47,2
17 348.4	47,2	CuZn20Al2As	49,2
VLX 439	47,2	12 021.1	50,2

Podmínky platnosti:

$$\frac{D_{vnitb}}{2 \cdot r_{is}} \leq 1$$

$$\frac{1203,2[mm]}{2 \cdot 1517,8[mm]} \leq 1$$

$$0,396 \leq 1 \quad \text{VYHOVUJE}$$

Tab.4.281. Hodnoty $D_{vnitb} / 2r_{is}$ pro všechny varianty výměníku

17 248.4	0,396	TiGr2	0,410
17 348.4	0,396	CuZn20Al2As	0,372
VLX 439	0,396	12 021.1	0,361

Další potřebné parametry:

$$Ap_\varphi = 0 [mm^2]$$

tlakem zatížená plocha vlivem šikmě umístěného hrdla pod úhlem φ

$$Af_w = 0 [mm^2]$$

napětím zatížená plocha svaru

$$f_b = 143,333[MPa]$$

maximální dovolené napětí materiálu hrdla

$$f_p = 143,333[MPa]$$

maximální dovolené napětí materiálu límce

Podmínka:

$$f_b \leq f_c \quad 143,333[MPa] \leq 143,333[MPa] \quad \text{VYHOVUJE}$$

$$f_p \leq f_c \quad 143,333[MPa] \leq 143,333[MPa] \quad \text{VYHOVUJE}$$

Šířka výztužného límce l_p : $l_p = 280\text{mm}$

Hodnota l_p stejná pro všechny varianty výměníku.

Analyzovaná tloušťka výztužného límce e_{ap} : $e_{ap} = 36\text{mm}$

Hodnota e_{ap} stejná pro všechny varianty výměníku.

Podmínka:

$$e_{ap} \leq 1,5 \cdot e_{Ca}$$

$$36[mm] \leq 1,5 \cdot 47,2[mm]$$

$$36[mm] \leq 70,8[mm] \quad \text{VYHOVUJE}$$

Podmínky VYHOVUJÍ všechny varianty výměníku.

Maximální vyztužující délka vnější části hrdla l_{bo} :

$$l_{bo} = \sqrt{(D_{exb} - e_b) \cdot e_b} = \sqrt{(1248[mm] - 22,4[mm]) \cdot 22,4[mm]} = 165,691[mm]$$

Hodnoty l_{bo} hrdla jsou pro ostatní varianty výměníku stejné

Parametr l_{so} :

$$l_{so} = \sqrt{((D_{exc} - 2 \cdot e_{Cs}) + e_c) \cdot e_c} =$$

$$= \sqrt{((3100[mm] - 2 \cdot 47,2[mm]) + 22,4[mm]) \cdot 22,4[mm]} = 312,757[mm]$$

Tab.4.282. Hodnoty l_{so} pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	312,757	TiGr2	307,567
17 348.4	312,757	CuZn20Al2As	332,663
VLX 439	313,271	12 021.1	342,615

Efektivní vyztužující délka vnější části hrdla l_b' :

$$l_b' = \min(l_b; l_{bo}) = \min(180[mm]; 165,691[mm]) = 165,691[mm]$$

Hodnoty l_b' hrdla jsou pro ostatní varianty výměníku stejné.

Efektivní vyztužující délka vnitřní části hrdla l_{bi}' :

$$l_{bi}' = \min(l_{bi}; 0,5 \cdot l_{bo}) = \min(20[mm]; 0,5 \cdot 165,691[mm]) = 20[mm]$$

Hodnoty l_{bi}' hrdla jsou pro ostatní varianty výměníku stejné.

Délka skořepiny mezi otvorem a diskontinuitou l_s : $l_s = w = 300\text{mm}$

Hodnoty l_s hrdla jsou pro ostatní varianty výměníku stejné.

Efektivní vyztužující délka skořepiny l'_s :

$$l'_s = \min(l_s; l_{so}) = \min(300[mm]; 312,757[mm]) = 300[mm]$$

Hodnoty l'_s hrdla jsou pro ostatní varianty výměníku stejné.

Efektivní vyztužující šířka výztužného límce l'_p :

$$l'_p = \min(l_p; l_{so}) = \min(280[mm]; 312,757[mm]) = 280[mm]$$

Hodnoty l'_p hrdla jsou pro ostatní varianty výměníku stejné.

Podmínka:

$$D_{exb} \leq 0,15 \cdot \sqrt{(2 \cdot r_{is} + e_c) \cdot e_c}$$

$$1248[mm] \leq 0,15 \cdot \sqrt{(2 \cdot 1517,8[mm] + 32,2[mm]) \cdot 32,2[mm]}$$

$$1248[mm] \leq 47,145[mm]$$

NEVYHOVUJE – nejedná se o malý otvor

Podmínice NEVYHOVUJÍ všechny varianty výměníku.

Podmínka:

$$w \leq l_{so}$$

$$300[mm] \leq 312,757[mm] \quad \text{VYHOVUJE}$$

Podmínice VYHOVUJÍ všechny varianty výměníku.

Podmínka:

$$w \geq w_{\min}$$

$$300[mm] \geq 96,6[mm] \quad \text{VYHOVUJE}$$

Podmínka splněna pro všechny varianty výměníku.

Podélný řez:

Parametr a :

$$a = 0,5 \cdot D_{exb} = 0,5 \cdot 1248[mm] = 624[mm]$$

Hodnoty a hrdla jsou pro ostatní varianty výměníku stejné.

Plocha Ap_{sp} :

$$Ap_{sp} = r_{is} \cdot (l'_s + a) = 1517,8[mm] \cdot (300[mm] + 624[mm]) = 1402447,2[mm^2]$$

Tab.4.283. Hodnoty Ap_{sp} pro všechny varianty výměníku [mm^2]

17 248.4	1402447,2	TiGr2	1356247,2
17 348.4	1402447,2	CuZn20Al2As	1492999,2
VLX 439	1402447,2	12 021.1	1538275,2

Příčný řez

Parametr r_{ms} :

$$r_{ms} = r_{is} + 0,5 \cdot e_{Cs} = 1517,8[mm] + 0,5 \cdot 47,2[mm] = 1541,4[mm]$$

Tab.4.284. Hodnoty r_{ms} pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	1541,4	TiGr2	1491,4
17 348.4	1541,4	CuZn20Al2As	1640,4
VLX 439	1541,4	12 021.1	1689,9

Parametr δ :

$$\delta = \frac{D_{exb}}{2 \cdot r_{ms}} = \frac{1248[mm]}{2 \cdot 1541,4[mm]} = 0,405$$

Tab.4.285. Hodnoty δ pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	0,405	TiGr2	0,418
17 348.4	0,405	CuZn20Al2As	0,380
VLX 439	0,405	12 021.1	0,369

Parametr a_p :

$$a_p = r_{mC} \cdot \arcsin(\delta) = 1541,4[mm] \cdot \arcsin(0,405) = 642,439[mm]$$

Tab.4.286. Hodnoty a_p pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	642,439	TiGr2	643,810
17 348.4	642,439	CuZn20Al2As	640,122
VLX 439	642,439	12 021.1	639,128

Plocha $Ap_{spř}$:

$$Ap_{spř} = 0,5 \cdot r_{is}^2 \cdot \frac{l'_s + a_p}{0,5 \cdot e_{Cs} + r_{is}} = 0,5 \cdot 1517,8^2 [mm^2] \cdot \frac{300[mm] + 642,439[mm]}{0,5 \cdot 47,2[mm] + 1517,8[mm]} = 707710,074 [mm^2]$$

Tab.4.287. Hodnoty $Ap_{spř}$ pro všechny varianty výměníku [mm²]

17 248.4	707710,074	TiGr2	685146,985
17 348.4	707710,074	CuZn20Al2As	751571,062
VLX 439	707710,074	12 021.1	773552,343

Plocha Ap_s :

$$Ap_s = \max(Ap_{sp}; Ap_{spř}) = \max(1402447,2 [mm^2]; 707710,074 [mm^2]) = 1402447,2 [mm^2]$$

Tab.4.288. Hodnoty Ap_s pro všechny varianty výměníku [mm²]

17 248.4	1402447,2	TiGr2	1356247,2
17 348.4	1402447,2	CuZn20Al2As	1492999,2
VLX 439	1402447,2	12 021.1	1538275,2

Plocha Af_s :

$$Af_s = l'_s \cdot e_{Cs} = 300[mm] \cdot 47,2[mm] = 14160 [mm^2]$$

Tab.4.289. Hodnoty Af_s pro všechny varianty výměníku [mm²]

17 248.4	14160	TiGr2	14160
17 348.4	14160	CuZn20Al2As	14760
VLX 439	14160	12 021.1	15060

Plocha Af_p :

$$Af_p = l_p \cdot e_p = 280[mm] \cdot 36[mm] = 10080[mm^2]$$

Hodnoty Af_p hrdla jsou pro ostatní varianty výměníku stejné.

Plocha Af_b :

$$Af_b = (l_b + l_{bi} + e_{Cs}) \cdot e_b = (165,691[mm] + 20[mm] + 47,2[mm]) \cdot 22,4[mm] = 5216,754[mm^2]$$

Tab.4.290. Hodnoty Af_b pro všechny varianty výměníku [mm²]

17 248.4	5216,754	TiGr2	5216,754
17 348.4	5216,754	CuZn20Al2As	5261,554
VLX 439	5216,754	12 021.1	5283,954

Plocha Ap_b :

$$Ap_b = \frac{D_{vnitb}}{2} \cdot (e_{Cs} + l_b) = \frac{1203,2[mm]}{2} \cdot (47,2[mm] + 165,691[mm]) = 128075,103[mm^2]$$

Tab.4.291. Hodnoty Ap_b pro všechny varianty výměníku [mm²]

17 248.4	128075,103	TiGr2	128075,103
17 348.4	128075,103	CuZn20Al2As	129278,301
VLX 439	128075,103	12 021.1	129879,903

Provozní stav:

Zatížení A_1 :

$$\begin{aligned} A_1 &= (Af_c + Af_w) \cdot (f_c - 0,5 \cdot P_T) + Af_p \cdot (f_p - 0,5 \cdot P_T) + Af_b \cdot (f_b - 0,5 \cdot P_T) = \\ &= (14160[mm^2] + 0[mm^2]) \cdot (143,333[MPa] - 0,5 \cdot 2,5[MPa]) + \\ &+ 10080[mm^2] \cdot (143,333[MPa] - 0,5 \cdot 2,5[MPa]) + \\ &+ 5216,753[mm^2] \cdot (143,333[MPa] - 0,5 \cdot 2,5[MPa]) = 4185310,758[N] \end{aligned}$$

Tab.4.292. Hodnoty A_1 pro všechny varianty výměníku [N]

17 248.4	4185310,415	TiGr2	4185310,415
17 348.4	4185310,415	CuZn20Al2As	4276925,748
VLX 439	4185310,415	12 021.1	4322733,415

Zatížení A_2 :

$$\begin{aligned} A_2 &= P_T \cdot (Ap_s + Ap_b + 0,5 \cdot Ap_\phi) = \\ &= 2,5[MPa] \cdot (1402447,2[mm^2] + 128075,103[mm^2] + 0,5 \cdot 0[mm^2]) = 3826305,758[N] \end{aligned}$$

Tab.4.293. Hodnoty A_2 pro všechny varianty výměníku [N]

17 248.4	3826305,758	TiGr2	3710805,758
17 348.4	3826305,758	CuZn20Al2As	4055693,758
VLX 439	3826305,758	12 021.1	4170387,758

Využití:

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{3826305,758}{4185310,415} = 0,914 \leq 1 \quad \text{VYHOVUJE}$$

Tab.4.294. Hodnoty A_2 / A_1 pro všechny varianty výměníku [N]

17 248.4	0,914	TiGr2	0,887
17 348.4	0,914	CuZn20Al2As	0,948
VLX 439	0,914	12 021.1	0,965

Stav při $t = 20^\circ\text{C}$:Zatížení A_1 :

$$\begin{aligned}
 A_1 &= (Af_c + Af_w) \cdot (f_{c20} - 0,5 \cdot P_T) + Af_p \cdot (f_p - 0,5 \cdot P_T) + Af_b \cdot (f_b - 0,5 \cdot P_T) = \\
 &= (14160 [\text{mm}^2] + 0 \cdot [\text{mm}^2]) \cdot (170 [\text{MPa}] - 0,5 \cdot 2,5 [\text{MPa}]) + \\
 &+ 10080 [\text{mm}^2] \cdot (170 [\text{MPa}] - 0,5 \cdot 2,5 [\text{MPa}]) + \\
 &+ 5216,754 [\text{mm}^2] \cdot (170 [\text{MPa}] - 0,5 \cdot 2,5 [\text{MPa}]) = 4970827,210 [\text{N}]
 \end{aligned}$$

Tab.4.295. Hodnoty A_1 pro všechny varianty výměníku [N]

17 248.4	4970827,210	TiGr2	4970827,210
17 348.4	4970827,210	CuZn20Al2As	5079637,210
VLX 439	4970827,210	12 021.1	5134042,210

Zatížení A_2 :

$$\begin{aligned}
 A_2 &= P_T \cdot (Ap_s + Ap_b + 0,5 \cdot Ap_\phi) = \\
 &= 2,5 [\text{MPa}] \cdot (1402447,2 [\text{mm}^2] + 128075,103 [\text{mm}^2] + 0,5 \cdot 0 [\text{mm}^2]) = 3826305,758 [\text{N}]
 \end{aligned}$$

Tab.4.296. Hodnoty A_2 pro všechny varianty výměníku [N]

17 248.4	3826305,758	TiGr2	3710805,758
17 348.4	3826305,758	CuZn20Al2As	4055693,758
VLX 439	3826305,758	12 021.1	4170387,758

Využití:

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{3826305,758}{4970827,210} = 0,770 \leq 1 \quad \text{VYHOVUJE}$$

Tab.4.297. Hodnoty A_2 / A_1 pro všechny varianty výměníku [N]

17 248.4	0,770	TiGr2	0,747
17 348.4	0,770	CuZn20Al2As	0,798
VLX 439	0,770	12 021.1	0,812

Maximální zatěžující tlak P_{max} :

$$P_{max} \geq P$$

$$P_{max} = \frac{(Af_s + Af_w) \cdot f_s + Af_b \cdot f_b + Af_p \cdot f_p}{(Ap_s + Ap_b + 0,5 \cdot Ap_\varphi) + 0,5 \cdot (Af_s + Af_w + Af_b + Af_p)} =$$

$$= \frac{(14160[mm^2] + 0[mm^2]) \cdot 143,333[MPa] + 5216,754[mm^2] \cdot 143,333[MPa] + 10080[mm^2] \cdot 143,333[MPa]}{(1402447,2[mm^2] + 128075,103[mm^2] + 0) + 0,5 \cdot (14160[mm^2] + 0 + 5216,754[mm^2] + 10080[mm^2])} =$$

$$= 2,732[MPa]$$

$$2,732[MPa] \geq 2,5[MPa] \quad \text{VYHOVUJE}$$

Tab.4.298. Hodnoty P_{max} pro všechny varianty výměníku [MPa]

17 248.4	2,732	TiGr2	2,817
17 348.4	2,732	CuZn20Al2As	2,635
VLX 439	2,732	12 021.1	2,591

Vyztužený otvor o maximálním průměru $d = 1248\text{mm}$ **VYHOVUJE** provoznímu zatížení.

Maximální rozměr vyztuženého otvoru v plášti vodní komory $d = 1248\text{mm}$ **VYHOVUJE** rozměrům vstupního / výstupního hrdla $DN = 1200$ s uvažováním tlouštěk stěn hrdla.

4.3 Plášť parní

dle: **ČSN EN 13445 – 3 – 7.4. , 8.4**

4.3.1 Vlastnosti materiálu, volba základních rozměrů komponenty

Materiál parního pláště: P265GH EN 10028 – 2 (výp. teplota $t_S = 200^\circ\text{C}$)

Mez kluzu R_{eHS} pro tloušťku výrobku $16 < t \leq 40\text{ mm}$ z tabulek: $R_{eHS} = 255\text{ MPa}$

Hodnoty R_{eHS} parního pláště jsou pro ostatní varianty výměníku stejné.

Minimální hodnota meze kluzu $0,2\%$ $R_{p0,2tS}$ pro teplotu $t_S = 200^\circ\text{C}$ a tloušťku výrobku $16 < t \leq 40\text{ mm}$ z tabulek:

$$R_{p0,2tS} = 197\text{ MPa}$$

Hodnoty $R_{p0,2tS}$ parního pláště jsou pro ostatní varianty výměníku stejné.

Mez pevnosti v tahu R_{mS} pro tloušťku výrobku $t \leq 16\text{ mm}$ z tabulek: $R_{mS} = 410\text{ MPa}$

Hodnoty R_{mS} parního pláště jsou pro ostatní varianty výměníku stejné.

Modul pružnosti E_S pro teplotu $t_S = 200^\circ\text{C}$ z tabulek: $E_S = 191000\text{ MPa}$

Hodnoty E_S parního pláště jsou pro ostatní varianty výměníku stejné.

Průměrná tloušťka pláště e_{Sav} : $e_{Sav} = 16 \text{ mm}$

Hodnoty e_{Sav} parního pláště jsou pro ostatní varianty výměníku stejné.

Poissonova konstanta pro plášť ν_S : $\nu_S = 0,3$

Hodnoty ν_S parního pláště jsou pro ostatní varianty výměníku stejné.

Vnější průměr pláště D_{exS} : $D_{exS} = 3600 \text{ mm}$

Tab.4.299. Hodnoty D_{exS} pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	3600	TiGr2	3400
17 348.4	3600	CuZn20Al2As	3800
VLX 439	3600	12 021.1	3800

Úbytek koroze pláště c_S : $c_S = 1 \text{ mm}$

Hodnoty c_S parního pláště jsou pro ostatní varianty výměníku stejné.

Dolní úchylka tloušťky δ_S : $\delta_S = 0,6 \text{ mm}$

Hodnoty δ_S parního pláště jsou pro ostatní varianty výměníku stejné.

Analýzovaná tloušťka pláště e_S : $e_S = e_{Sav} - c_S - \delta_S = 16[mm] - 1[mm] - 0,6[mm] = 14,4[mm]$

Hodnoty e_S parního pláště jsou pro ostatní varianty výměníku stejné.

Vnitřní průměr pláště D_{vniS} : $D_{vniS} = D_{exS} - 2 \cdot e_S = 3600[mm] - 2 \cdot 14,4[mm] = 3571,2[mm]$

Tab.4.300. Hodnoty D_{vniS} pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	3571,2	TiGr2	3371,2
17 348.4	3571,2	CuZn20Al2As	3771,2
VLX 439	3571,2	12 021.1	3771,2

Vnitřní průměr pláště bez přírůstku na korozi D_S :

$$D_S = D_{vniS} + 2 \cdot c_S = 3571,2[mm] + 2 \cdot 1[mm] = 3573,2[mm]$$

Tab.4.301. Hodnoty D_S pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	3573,2	TiGr2	3373,2
17 348.4	3573,2	CuZn20Al2As	3773,2
VLX 439	3573,2	12 021.1	3773,2

Dovolená namáhání pláště f_S :

$$f_S = \text{menší } z \left(\frac{R_{p0,2S}}{1,5} < \frac{R_{mS}}{2,4} \right) = \text{menší } z \left(\frac{197[MPa]}{1,5} < \frac{410[MPa]}{2,4} \right) = 131,333[MPa]$$

Hodnoty f_S parního pláště jsou pro ostatní varianty výměníku stejné.

Dovolená namáhání pláště pro okolní teplotu f_{s20} :

$$f_{s20} = \text{menší } z \left(\frac{R_{eHS}}{1,5} < \frac{R_{mS}}{2,4} \right) = \text{menší } z \left(\frac{255[MPa]}{1,5} < \frac{410[MPa]}{2,4} \right) = 170[MPa]$$

Hodnoty f_{s20} parního pláště jsou pro ostatní varianty výměníku stejné.

Součinitel z : $z = 0,85 \text{ mm}$

Hodnoty z parního pláště jsou pro ostatní varianty výměníku stejné.

4.3.2 Výpočet

4.3.2.1 Zatížení vnitřním tlakem

Všechny parametry budou vypočteny detailně pro variantu 17 248.4, pro ostatní varianty výměníku budou uvedeny výsledky v tabulce.

Požadovaná tloušťka stěny e :

$$e = \frac{P_{s1} \cdot D_{exS}}{2 \cdot f_s \cdot z + P} = \frac{0,4[MPa] \cdot 3600[mm]}{2 \cdot 131,333[MPa] \cdot 0,85 + 0,4[MPa]} = 6,440[mm]$$

Tab.4.302. Hodnoty e pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	6,440	TiGr2	6,080
17 348.4	6,440	CuZn20Al2As	6,796
VLX 439	6,440	12 021.1	6,796

Využití e/e_{sav} :

$$\frac{e}{e_{sav}} = \frac{6,440[mm]}{12[mm]} = 0,402 \leq 1 \quad \text{VYHOVUJE}$$

Tab.4.303. Hodnoty e/e_{sav} pro všechny varianty výměníku

17 248.4	0,402	TiGr2	0,380
17 348.4	0,402	CuZn20Al2As	0,425
VLX 439	0,402	12 021.1	0,425

Střední průměr pláště D_m :

$$D_m = \frac{D_{exS} + D_{vnitS}}{2} = \frac{3600[mm] + 3571,2[mm]}{2} = 3585,6[mm]$$

Tab.4.304. Hodnoty D_m pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	3585,6	TiGr2	3385,6
17 348.4	3585,6	CuZn20Al2As	3785,6
VLX 439	3585,6	12 021.1	3785,6

Korozní stav a výpočtová teplota

$$P_{\max} \geq P_{S1}$$

$$P_{\max} = \frac{2 \cdot f_s \cdot z \cdot e_s}{D_m} = \frac{2 \cdot 131,333 [\text{MPa}] \cdot 0,85 \cdot 14,4 [\text{mm}]}{3585,6 [\text{mm}]} = 0,897 [\text{MPa}] \geq 0,4 [\text{MPa}] \quad \text{VYHOVUJE}$$

Tab.4.305. Hodnoty P_{\max} pro všechny varianty výměníku [MPa]

17 248.4	0,897	TiGr2	0,950
17 348.4	0,897	CuZn20Al2As	0,849
VLX 439	0,897	12 021.1	0,849

Nekorozní stav a okolní teplota

$$P_{\max 20} \geq P_{S1}$$

$$P_{\max 20} = \frac{2 \cdot f_{s20} \cdot z \cdot (e_s + c_s)}{D_m} = \frac{2 \cdot 170 [\text{MPa}] \cdot 0,85 \cdot (14,4 [\text{mm}] + 1 [\text{mm}])}{3585,6 [\text{mm}]} = 1,241 [\text{MPa}] \geq 0,4 [\text{MPa}] \quad \text{VYHOVUJE}$$

Tab.4.306. Hodnoty $P_{\max 20}$ pro všechny varianty výměníku [MPa]

17 248.4	1,241	TiGr2	1,315
17 348.4	1,241	CuZn20Al2As	1,176
VLX 439	1,241	12 021.1	1,176

Podmínka platnosti

$$\frac{e}{D} \leq 0,16$$

$$\frac{6,438 [\text{mm}]}{3600 [\text{mm}]} \leq 0,16$$

$$0,002 \leq 0,16 \quad \text{VYHOVUJE}$$

Tab.4.307. Hodnoty e/D pro všechny varianty výměníku

17 248.4	0,002	TiGr2	0,002
17 348.4	0,002	CuZn20Al2As	0,002
VLX 439	0,002	12 021.1	0,002

Otvory v blízkosti diskontinuit

Poloměr vnitřní stěny skořepiny r_{is} :

$$r_{is} = \frac{D_{ivnS}}{2} = \frac{3571,2 [\text{mm}]}{2} = 1785,6 [\text{mm}]$$

Tab.4.308. Hodnoty r_{is} pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	1785,6	TiGr2	1685,6
17 348.4	1785,6	CuZn20Al2As	1885,6
VLX 439	1785,6	12 021.1	1885,6

Minimální vzdálenost otvoru od diskontinuit w_{min} :

$$w_{min} = \max \left[0, 2 \cdot \sqrt{(2 \cdot r_{is} + e_s) \cdot e_s}; 3 \cdot e_s \right] =$$

$$= \max \left[0, 2 \cdot \sqrt{(2 \cdot 1785,6 [mm] + 14,4 [mm]) \cdot 14,4 [mm]}; 3 \cdot 14,4 [mm] \right] = 45,446 [mm]$$

Tab.4.309. Hodnoty w_{min} pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	45,446	TiGr2	44,160
17 348.4	45,446	CuZn20Al2As	46,696
VLX 439	45,446	12 021.1	46,696

Tloušťka stěny parního pláště **VYHOVUJE** zatížení vnitřním tlakem.

4.3.2.2 Zatížení vnějším tlakem

Dovolená elastická mezní hodnota σ_e :

$$\sigma_e = Rp0,2t = 197 [MPa]$$

Hodnoty σ_e parního pláště jsou pro ostatní varianty výměníku stejné.

Minimální součinitel bezpečnosti S : $S = 1,5$

Hodnoty S parního pláště jsou pro ostatní varianty výměníku stejné.

Nevyztužená délka L :

$$L = L_{cyl} + 0,4 \cdot h' + 0,4 \cdot h''$$

kde:

$$\begin{array}{lll} L_{cyl} & \text{délka válcového pláště} & L_{cyl} = L_{tr} \\ h, h' & \text{vnější výška klenutí den} & h, h' = 0 \text{ mm} \end{array}$$

$$L = L_{cyl} + 0,4 \cdot h' + 0,4 \cdot h'' = 5760 [mm] + 0,4 \cdot 0 [mm] + 0,4 \cdot 0 [mm] = 5760 [mm]$$

Tab.4.310. Hodnoty L pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	5760	TiGr2	5150
17 348.4	5760	CuZn20Al2As	4180
VLX 439	4980	12 021.1	4250

Tloušťka stěny válcového pláště

a) tlak při kterém střední obvodové napětí dosáhne meze kluzu P_y :

$$P_y = \frac{\sigma_e \cdot e_s}{R} = \frac{2 \cdot \sigma_e \cdot e_s}{D_m} = \frac{2 \cdot 197 [MPa] \cdot 14,4 [mm]}{3585,6 [mm]} = 1,582 [MPa]$$

Tab.4.311. Hodnoty P_y pro všechny varianty výměníku [MPa]

17 248.4	1,582	TiGr2	1,676
17 348.4	1,582	CuZn20Al2As	1,499
VLX 439	1,582	12 021.1	1,499

b) teoretický tlak při elastické ztrátě stability P_m :

potřebné parametry:

počet vln po obvodě u nevyztuženého válce n_{cyl} :

hodnota $L/2R$:

$$\frac{L}{2 \cdot R} = \frac{L}{D_m} = \frac{5760[mm]}{3585,6[mm]} = 1,606$$

Tab.4.312. Hodnoty $L/2R$ pro všechny varianty výměníku

17 248.4	1,606	TiGr2	1,521
17 348.4	1,606	CuZn20Al2As	1,104
VLX 439	1,389	12 021.1	1,122

Parametr $e_s/2R$:

$$\frac{e_s}{2 \cdot R} = \frac{e_s}{D_m} = \frac{14,4[mm]}{3585,6[mm]} = 0,004$$

Tab.4.313. Hodnoty $e_s/2R$ pro všechny varianty výměníku

17 248.4	0,004	TiGr2	0,004
17 348.4	0,004	CuZn20Al2As	0,004
VLX 439	0,004	12 021.1	0,004

Z grafu.8.5 – 4 této normy se určí hodnota n_{cyl} : $n_{cyl} = 5$

Hodnoty n_{cyl} parního pláště jsou pro ostatní varianty výměníku stejné.

Parametr Z :

$$Z = \frac{\pi \cdot R}{L} = \frac{\pi \cdot D_m}{2 \cdot L} = \frac{\pi \cdot 3585,6[mm]}{2 \cdot 5760[mm]} = 0,978$$

Tab.4.314. Hodnoty Z pro všechny varianty výměníku

17 248.4	0,978	TiGr2	1,033
17 348.4	0,978	CuZn20Al2As	1,423
VLX 439	1,131	12 021.1	1,399

Střední elastická poměrná obvodová deformace při zborcení ε :

$$\varepsilon = \frac{1}{n_{cyl}^2 - 1 + \frac{Z^2}{2}} \cdot \left\{ \frac{1}{\left(\frac{n_{cyl}^2}{Z^2} + 1 \right)^2} + \frac{e_s^2}{12 \cdot R^2 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot (n_{cyl}^2 - 1 + Z^2)^2 \right\} =$$

$$\frac{1}{5^2 - 1 + \frac{0,978^2}{2}} \cdot \left\{ \frac{1}{\left(\frac{5^2}{0,978^2} + 1 \right)^2} + \frac{2 \cdot 14,4^2 [mm^2]}{12 \cdot 3585,6^2 [mm^2] \cdot (1 - 0,3^2)} \cdot (5^2 - 1 + 0,978^2)^2 \right\} =$$

$$= 0,206 \cdot 10^{-3}$$

Tab.4.315. Hodnoty ε pro všechny varianty výměníku

17 248.4	0,206 x 10⁻³	TiGr2	0,238 x 10 ⁻³
17 348.4	0,206 x 10 ⁻³	CuZn20Al2As	0,368 x 10 ⁻³
VLX 439	0,249 x 10 ⁻³	12 021.1	0,354 x 10 ⁻³

teoretický tlak při elastické ztrátě stability P_m

$$P_m = \frac{E \cdot e_s \cdot \varepsilon}{R} = \frac{2 \cdot E \cdot e_s \cdot \varepsilon}{D_m} = \frac{2 \cdot 191000 [MPa] \cdot 14,4 [mm] \cdot 0,000206}{3585,6 [mm]} = 0,316 [MPa]$$

Tab.4.316. Hodnoty P_m pro všechny varianty výměníku [MPa]

17 248.4	0,316	TiGr2	0,387
17 348.4	0,316	CuZn20Al2As	0,534
VLX 439	0,383	12 021.1	0,515

Poměr P_m/P_y :

$$\frac{P_m}{P_y} = \frac{0,316 [MPa]}{1,582 [MPa]} = 0,199$$

Tab.4.317. Hodnoty P_m/P_y pro všechny varianty výměníku

17 248.4	0,199	TiGr2	0,231
17 348.4	0,199	CuZn20Al2As	0,357
VLX 439	0,242	12 021.1	0,343

Z Obr.8.5 – 5 této normy se určí poměr P_r/P_y :

Tab.4.318. Hodnoty P_r/P_y pro všechny varianty výměníku

17 248.4	0,099	TiGr2	0,115
17 348.4	0,099	CuZn20Al2As	0,175
VLX 439	0,122	12 021.1	0,172

Z tohoto se vypočte P_r :

$$P_r = P_y \cdot 0,099 = 1,585 [MPa] \cdot 0,099 = 0,157 [MPa]$$

Tab.4.319. Hodnoty P_r pro všechny varianty výměníku [MPa]

17 248.4	0,157	TiGr2	0,193
17 348.4	0,157	CuZn20Al2As	0,262
VLX 439	0,193	12 021.1	0,258

Dolní hranice tlaku, kdy dojde ke zborcení P_{min} :

$$P_{min} \geq P_{s2}$$

$$\frac{P_r}{S} \geq P_{s2}$$

$$\frac{0,157}{1,5} \geq 0,1$$

$$0,104 [MPa] \geq 0,1 [MPa] \quad \text{VYHOVUJE}$$

Tab.4.320. Hodnoty P_{min} pro všechny varianty výměníku [MPa]

17 248.4	0,104	TiGr2	0,128
17 348.4	0,104	CuZn20Al2As	0,175
VLX 439	0,129	12 021.1	0,172

Tloušťka stěny parního pláště **VYHOVUJE** zatížení vnějším tlakem.

4.3.2.3 Nevztlávané otvory

Průměr nevztlávaného otvoru d :

Tab.4.321. Hodnoty d pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	700	TiGr2	700
17 348.4	700	CuZn20Al2As	650
VLX 439	700	12 021.1	650

Parametr l_{so} :

$$l_{so} = \sqrt{(r_{is} + e_s) \cdot e_s} = \sqrt{(1785,6 [mm] + 14,4 [mm]) \cdot 14,4 [mm]} = 227,228 [mm]$$

Tab.4.322. Hodnoty l_{so} pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	227,228	TiGr2	220,800
17 348.4	227,228	CuZn20Al2As	233,479
VLX 439	227,228	12 021.1	233,479

Podélný řez

Parametr a :

$$a = 0,5 \cdot d = 0,5 \cdot 700 [mm] = 350 [mm]$$

Tab.4.323. Hodnoty a pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	350	TiGr2	350
17 348.4	350	CuZn20Al2As	325
VLX 439	350	12 021.1	325

Plocha Ap_{sp} :

$$Ap_{sp} = r_{is} \cdot (l_{so} + a) = 1785,6 [mm] \cdot (227,228 [mm] + 350 [mm]) = 1030698,6 [mm^2]$$

Tab.4.324. Hodnoty Ap_{sp} pro všechny varianty výměníku [mm²]

17 248.4	1030698,615	TiGr2	962140,480
17 348.4	1030698,615	CuZn20Al2As	1053068,796
VLX 439	1030698,615	12 021.1	1053068,796

Příčný řez

Parametr r_{mS} :

$$r_{mS} = r_{is} + 0,5 \cdot e_s = 1785,6 [mm] + 0,5 \cdot 14,4 [mm] = 1792,8 [mm]$$

Tab.4.325. Hodnoty r_{mS} pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	1792,8	TiGr2	1692,8
17 348.4	1792,8	CuZn20Al2As	1892,8
VLX 439	1792,8	12 021.1	1892,8

Parametr δ :

$$\delta = \frac{d}{2 \cdot r_{mS}} = \frac{700 [mm]}{2 \cdot 1792,8 [mm]} = 0,195$$

Tab.4.326. Hodnoty δ pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	0,195	TiGr2	0,207
17 348.4	0,195	CuZn20Al2As	0,172
VLX 439	0,195	12 021.1	0,172

Parametr a_p :

$$a_p = r_{mS} \cdot \arcsin(\delta) = 1792,8 [mm] \cdot \arcsin(0,195) = 352,262 [mm]$$

Tab.4.327. Hodnoty a_p pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	352,262	TiGr2	352,543
17 348.4	352,262	CuZn20Al2As	326,619
VLX 439	352,262	12 021.1	326,619

Plocha Ap_{spr} :

$$Ap_{spr} = 0,5 \cdot r_{is}^2 \cdot \frac{l_{so} + a_p}{0,5 \cdot e_s + r_{is}} = 0,5 \cdot 1785,6^2 [mm^2] \cdot \frac{227,228 [mm] + 352,262 [mm]}{0,5 \cdot 14,4 [mm] + 1785,6 [mm]} = 515291,278 [mm^2]$$

Tab.4.328. Hodnoty $Ap_{spř}$ pro všechny varianty výměníku [mm²]

17 248.4	515291,278	TiGr2	481158,151
17 348.4	515291,278	CuZn20Al2As	526051,646
VLX 439	515291,278	12 021.1	526051,646

Plocha Ap_s :

$$Ap_s = \max(Ap_{sp}; Ap_{spř}) = \max(1030698,615[mm^2]; 515291,278[mm^2]) = 1030698,615[mm^2]$$

Tab.4.329. Hodnoty Ap_s pro všechny varianty výměníku [mm²]

17 248.4	1030698,615	TiGr2	962140,480
17 348.4	1030698,615	CuZn20Al2As	1053068,796
VLX 439	1030698,615	12 021.1	1053068,796

Plocha Af_s :

$$Af_s = l_{so} \cdot e_s = 227,228[mm] \cdot 14,4[mm] = 3272,086[mm^2]$$

Tab.4.330. Hodnoty Af_s pro všechny varianty výměníku [mm²]

17 248.4	3272,086	TiGr2	3179,520
17 348.4	3272,086	CuZn20Al2As	3362,104
VLX 439	3272,086	12 021.1	3362,104

Plocha Ap_b :

$$Ap_b = \frac{d}{2} \cdot e_s = \frac{700[mm]}{2} \cdot 14,4[mm] = 5040[mm^2]$$

Tab.4.331. Hodnoty Ap_b pro všechny varianty výměníku [mm²]

17 248.4	5040	TiGr2	5040
17 348.4	5040	CuZn20Al2As	4680
VLX 439	5040	12 021.1	4680

Další potřebné parametry:

Platí pro všechny varianty výměníku:

$Af_b = 0 [mm^2]$	napětím zatížená plocha zapuštěného hrdla
$Ap_\varphi = 0 [mm^2]$	tlakem zatížená plocha vlivem šikmě umístěného hrdla pod úhlem φ
$Af_p = 0 [mm^2]$	napětím zatížená plocha vyztužujícího límce
$Af_w = 0 [mm^2]$	napětím zatížená plocha svaru

$f_b = 0 [MPa]$	maximální dovolené napětí materiálu hrdla
$f_p = 0 [MPa]$	maximální dovolené napětí materiálu límce

podmínka:

$$f_b \leq f_s \quad 0[MPa] \leq 131,333[MPa] \quad \text{VYHOVUJE}$$

$$f_p \leq f_s \quad 0[MPa] \leq 131,333[MPa] \quad \text{VYHOVUJE}$$

Tato podmínka je splněna pro plášť všech varianty výměníku.

Provozní stav:Zatížení A_1 :

$$A_1 = (Af_s + Af_w) \cdot (f_s - 0,5 \cdot P_{s1}) + Af_p \cdot (f_p - 0,5 \cdot P_{s1}) + Af_b \cdot (f_b - 0,5 \cdot P_{s1}) =$$

$$= (3272,086 [mm^2] + 0 \cdot [mm^2]) \cdot (131,333 [MPa] - 0,5 \cdot 0,4 [MPa]) +$$

$$+ 0 [mm^2] \cdot (0 [MPa] - 0,5 \cdot 0,4 [MPa]) + 0 [mm^2] \cdot (0 [MPa] - 0,5 \cdot 0,4 [MPa]) = 429079,493 [N]$$

Tab.4.332. Hodnoty A_1 pro všechny varianty výměníku [N]

17 248.4	429079,493	TiGr2	416941,056
17 348.4	429079,493	CuZn20Al2As	440883,860
VLX 439	429079,493	12 021.1	440883,860

Zatížení A_2 :

$$A_2 = P_{s1} \cdot (Ap_s + Ap_b + 0,5 \cdot Ap_\varphi) =$$

$$= 0,4 [MPa] \cdot (1030698,615 [mm^2] + 5040 [mm^2] + 0,5 \cdot 0 [mm^2]) = 414295,4 [N]$$

Tab.4.334. Hodnoty A_2 pro všechny varianty výměníku [N]

17 248.4	414295,4	TiGr2	386872,2
17 348.4	414295,4	CuZn20Al2As	423099,5
VLX 439	414295,4	12 021.1	423099,5

Využití:

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{414295,400}{429079,492} = 0,966 \leq 1 \quad \text{VYHOVUJE}$$

Tab.4.335. Hodnoty A_2 / A_1 pro všechny varianty výměníku [N]

17 248.4	0,966	TiGr2	0,928
17 348.4	0,966	CuZn20Al2As	0,960
VLX 439	0,966	12 021.1	0,960

Stav při $t = 20^\circ\text{C}$:Zatížení A_1 :

$$A_1 = (Af_s + Af_w) \cdot (f_{s20} - 0,5 \cdot P_{s1}) + Af_p \cdot (f_p - 0,5 \cdot P_{s1}) + Af_b \cdot (f_b - 0,5 \cdot P_{s1}) =$$

$$= (3272,086 [mm^2] + 0 \cdot [mm^2]) \cdot (170 [MPa] - 0,5 \cdot 0,4 [MPa]) +$$

$$+ 0 [mm^2] \cdot (0 [MPa] - 0,5 \cdot 0,4 [MPa]) + 0 [mm^2] \cdot (0 [MPa] - 0,5 \cdot 0,4 [MPa]) = 555600,136 [N]$$

Tab.4.336. Hodnoty A_1 pro všechny varianty výměníku [N]

17 248.4	555600,136	TiGr2	539882,496
17 348.4	555600,136	CuZn20Al2As	570885,202
VLX 439	555600,136	12 021.1	570885,202

Zatížení A_2 :

$$A_2 = P_{s1} \cdot (Ap_s + Ap_b + 0,5 \cdot Ap_\varphi) =$$

$$= 0,4 [MPa] \cdot (1030698,615 [mm^2] + 5040 [mm^2] + 0,5 \cdot 0 [mm^2]) = 414295,4 [N]$$

Tab.4.337. Hodnoty A_2 pro všechny varianty výměníku [N]

17 248.4	414295,4	TiGr2	386872,2
17 348.4	414295,4	CuZn20Al2As	423099,5
VLX 439	414295,4	12 021.1	423099,5

Využití:

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{414295,400}{555600,136} = 0,746 \leq 1 \quad \text{VYHOVUJE}$$

Tab.4.338. Hodnoty A_2 / A_1 pro všechny varianty výměníku [N]

17 248.4	0,746	TiGr2	0,717
17 348.4	0,746	CuZn20Al2As	0,741
VLX 439	0,746	12 021.1	0,741

Nevyztužený otvor o maximálním průměru d viz. Tab.4.321. **VYHOVUJE.**

Rozměry hrdla pro odvod kondenzátu DN 300 i s uvažováním tloušťky stěny hrdla **VYHOVUJÍ** rozměrům nevyztuženého otvoru v parním plášti d v plném rozsahu.

4.3.2.4 Vyztužené otvory

Kontrolovaný maximální průměr nevyztuženého otvoru v parním plášti je malý ve srovnání rozměry otvoru potřebného pro umístění přívodního hrdla pro páru. Proto by se měl tento otvor vyztuzit vloženým hrdlem. Jelikož bylo přívodní hrdlo páry navrženo s obdélníkovým průtočným průřezem, je řešení vyztužení tohoto hrdla složité. V praxi se obvykle provádí metodou konečných prvků MKP. Toto přívodní hrdlo a ani jeho vyztužení na parním plášti nebylo počítáno.

4.4 Klenuté dno na straně vody

dle: **ČSN EN 13445 – 3 – 7.5, 9.4**

4.4.1 Vlastnosti materiálu, volba základních rozměrů komponenty

Materiál klenutého dna: P265GH EN 10028 – 2 (výp. teplota $t_T = 150^\circ\text{C}$)Rozměry dle: **DIN 28 013**Průměrná tloušťka stěny dna e_{Dav} : $e_{Dav} = 34 \text{ mm}$ Hodnota e_{dav} je stejná pro všechny varianty výměníku.

Mez kluzu R_{eH} pro tloušťku výrobku $16 < t \leq 40$ mm z tabulek: $R_{eH} = 255$ MPa

Hodnota R_{eH} je stejná pro všechny varianty výměníku.

Minimální hodnota meze kluzu 0,2% $R_{p0,2t}$ pro teplotu $t_T = 150^\circ\text{C}$ a tloušťku výrobku $16 < t \leq 40$ mm z tabulek:

$$R_{p0,2t} = 215 \text{ MPa}$$

Hodnota $R_{p0,2t}$ je stejná pro všechny varianty výměníku y.

Mez pevnosti v tahu R_m pro tloušťku výrobku $16 < t \leq 40$ mm z tabulek: $R_m = 410$ MPa

Hodnota R_m je stejná pro všechny varianty výměníku.

Modul pružnosti E pro teplotu $t_T = 150^\circ\text{C}$ z tabulek: $E = 196000$ MPa

Hodnota E je stejná pro všechny varianty výměníku.

Poissonova konstanta pro plášť dna ν : $\nu = 0,3$

Hodnota ν je stejná pro všechny varianty výměníku.

Vnější průměr pláště dna D_{exD} : $D_{exD} = 3100$ mm

Tab.4.339. Hodnoty D_{exD} pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	3100	TiGr2	3000
17 348.4	3100	CuZn20Al2As	3300
VLX 439	3100	12 021.1	3400

Úbytek koroze stěny dna c_D : $c_D = 1$ mm

Hodnota c_D je stejná pro všechny varianty výměníku.

Dolní úchylka tloušťky δ_D : $\delta_D = 0,8$ mm

Hodnota δ_D je stejná pro všechny varianty výměníku.

Analyzovaná tloušťka skořepiny e_D :

$$e_D = e_{Dav} - c_D - \delta_D = 34[\text{mm}] - 1[\text{mm}] - 0,8[\text{mm}] = 32,8[\text{mm}]$$

Hodnota δ_D je stejná pro všechny varianty výměníku.

Dovolená namáhání skořepiny f_D :

$$f_D = \text{menší } z \left(\frac{R_{p0,2}}{1,5} < \frac{R_m}{2,4} \right) = \text{menší } z \left(\frac{215[\text{MPa}]}{1,5} < \frac{410[\text{MPa}]}{2,4} \right) = 143,333[\text{MPa}]$$

Hodnota f_D je stejná pro všechny varianty výměníku.

Dovolená namáhání skořepiny pro okolní teplotu f_{D20} :

$$f_{D20} = \text{menší } z \left(\frac{R_{eH}}{1,5} < \frac{R_m}{2,4} \right) = \text{menší } z \left(\frac{255[MPa]}{1,5} < \frac{410[MPa]}{2,4} \right) = 170[MPa]$$

Hodnota f_{D20} je stejná pro všechny varianty výměníku.

Součinitel z : $z = 1 \text{ mm}$

Hodnota z je stejná pro všechny varianty výměníku.

Délka válcové části dna h_l : pro tloušťku stěny $e_{Dav} = 34\text{mm}$ z tabulek $h_l = 110\text{mm}$

Hodnota h_l je stejná pro všechny varianty výměníku.

4.4.2 Výpočet

4.4.2.1 Zatížení vnitřním tlakem

Všechny parametry budou vypočteny detailně pro variantu 17 248.4, pro ostatní varianty výměníku budou uvedeny výsledky v tabulce.

Velký poloměr klenutého dna R :

$$R = 0,8 \cdot D_{exD} = 0,8 \cdot 3100[mm] = 2480[mm]$$

Tab.4.340. Hodnoty R pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	2480	TiGr2	2400
17 348.4	2480	CuZn20Al2As	2640
VLX 439	2480	12 021.1	2720

Malý poloměr klenutého dna r :

$$r = 0,154 \cdot D_{exD} = 0,154 \cdot 3100[mm] = 477,4[mm]$$

Tab.4.341. Hodnoty r pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	477,4	TiGr2	460
17 348.4	477,4	CuZn20Al2As	508,2
VLX 439	477,4	12 021.1	523,6

Požadovaná tloušťka stěny e :

$$e = \frac{P_T \cdot R}{2 \cdot f_D \cdot z + P_T} = \frac{2,5[MPa] \cdot 2480[mm]}{2 \cdot 143,333[MPa] \cdot 1 + 2,5[MPa]} = 21,723[mm]$$

Tab.4.342. Hodnoty e pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	21,723	TiGr2	21,022
17 348.4	21,723	CuZn20Al2As	23,124
VLX 439	21,723	12 021.1	23,825

Iterační výpočet:

Konečná hodnota výpočtové tloušťky stěny klenutého dna e_{Dvyp} :

Tab.4.343. Hodnoty e_{Dvyp} pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	26,956	TiGr2	26,106
17 348.4	26,956	CuZn20Al2As	28,717
VLX 439	26,956	12 021.1	29,587

Parametr Y:

$$Y = \min\left(\frac{e_{Dvyp}}{R}; 0,04\right) = \min\left(\frac{26,956}{2480}; 0,04\right) = 0,011$$

Hodnota Y je stejná pro všechny varianty výměníku.

Parametr Z:

$$Z = \log\left(\frac{1}{Y}\right) = \log\left(\frac{1}{0,011}\right) = 1,964$$

Hodnota Z je stejná pro všechny varianty výměníku.

Vnitřní průměr válcové části dna pro e_D D_{vnitD} :

$$D_{vnitD} = D_{exD} - 2 \cdot e_D = 3100[mm] - 2 \cdot 32,2[mm] = 3035,6[mm]$$

Tab.4.344. Hodnoty D_{vnitD} pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	3035,6	TiGr2	2935,6
17 348.4	3035,6	CuZn20Al2As	3235,6
VLX 439	3035,6	12 021.1	3335,6

Vnitřní průměr válcové části dna pro e_{Dvyp} D_{vnitDi} :

$$D_{vnitDi} = D_{exD} - 2 \cdot e_{Dvyp} = 3100[mm] - 2 \cdot 26,954[mm] = 3046,092[mm]$$

Tab.4.345. Hodnoty D_{vnitDi} pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	3046,092	TiGr2	2947,839
17 348.4	3046,092	CuZn20Al2As	3242,598
VLX 439	3046,092	12 021.1	3340,852

Parametr X:

$$X = \frac{r}{D_{vnitDi}} = \frac{477,4[mm]}{3046,092} = 0,157$$

Hodnota X je stejná pro všechny varianty výměníku.

Parametr N:

$$N = 1,006 - \left(\frac{1}{6,2 + (90 \cdot Y)^4} \right) = 1,006 - \left(\frac{1}{6,2 + (90 \cdot 0,011)^4} \right) = 0,865$$

Hodnota N je stejná pro všechny varianty výměníku.

Parametr $\beta_{0,1}$:Pro $X = 0,1$

$$\beta_{0,1} = N \cdot (-0,1833 \cdot Z^3 + 1,0383 \cdot Z^2 - 1,2943 \cdot Z + 0,837) =$$

$$= 0,865 \cdot (-0,1833 \cdot 1,964^3 + 1,0383 \cdot 1,964^2 - 1,2943 \cdot 1,964 + 0,837) = 0,789$$

Hodnota $\beta_{0,1}$ je stejná pro všechny varianty výměníku.Parametr $\beta_{0,2}$:Pro $X = 0,2$

$$\beta_{0,2} = \max \left[0,95 \cdot (0,56 - 1,94 \cdot Y - 82,5 \cdot Y^2); 0,5 \right] =$$

$$= \max \left[0,95 \cdot (0,56 - 1,94 \cdot 0,011 - 82,5 \cdot 0,011^2); 0,5 \right] = 0,503$$

Hodnota $\beta_{0,2}$ je stejná pro všechny varianty výměníku.Parametr β_1 :Pro $0,1 < X < 0,2$

$$\beta_1 = 10 \cdot ((0,2 - X) \cdot \beta_{0,1} + (X - 0,1) \cdot \beta_{0,2}) =$$

$$= 10 \cdot ((0,2 - 0,157) \cdot 0,789 + (0,157 - 0,1) \cdot 0,503) = 0,626$$

Parametr e_y :

$$e_y = \frac{(\beta_1 \cdot P_T \cdot (0,75 \cdot R + 0,2 \cdot D_{vmitD}))}{f_D} =$$

$$= \frac{(0,626 \cdot 2,5 [MPa] \cdot (0,75 \cdot 2480 [mm] + 0,2 \cdot 3035,6 [mm]))}{143,333 [MPa]} = 26,956 [mm]$$

Tab.4.346. Hodnoty e_y pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	26,956	TiGr2	26,106
17 348.4	26,956	CuZn20Al2As	28,717
VLX 439	26,956	12 021.1	29,587

Parametr e_b :

$$e_b = \max \left[0,005 \cdot D_{vmitD}; 0; (0,75 \cdot R + 0,2 \cdot D_{vmitD}) \cdot \sqrt[1,5]{\left(\left(\frac{P_T}{111 \cdot f_D} \right) \cdot \left(\frac{D_{vmitD}}{r} \right)^{0,825} \right)} \right] =$$

$$= \max (0,005 \cdot 3035,6 [mm]; 0; \dots) =$$

$$\dots (0,75 \cdot 2480 [mm] + 0,2 \cdot 3035,6 [mm]) \cdot \sqrt[1,5]{\left(\left(\frac{2,5 [MPa]}{111 \cdot 143,333 [MPa]} \right) \cdot \left(\frac{3035,6 [mm]}{477,4 [mm]} \right)^{0,825} \right)} =$$

$$= 19,871 [mm]$$

Tab.4.347. Hodnoty e_b pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	19,871	TiGr2	19,283
17 348.4	19,871	CuZn20Al2As	21,211
VLX 439	19,871	12 021.1	21,854

Parametr e_{Dvyp} :

$$e_{vyp} = \max(e_s; e_y; e_b) = \max(21,723[mm]; 26,956[mm]; 19,871[mm]) = 26,956[mm]$$

Tab.4.348. Hodnoty e_{Dvyp} pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	26,956	TiGr2	26,106
17 348.4	26,956	CuZn20Al2As	28,717
VLX 439	26,956	12 021.1	29,587

Konec iteračního výpočtu

Podmínka platnosti

$$e_{vyp} \leq e_D$$

$$26,956[mm] \leq 32,2[mm] \quad \text{VYHOVUJE}$$

Podmínky vyhovují všechny varianty výměníku.

Únosnost

Parametr Y :

$$Y = \min\left(\frac{e_D}{R}; 0,04\right) = \min\left(\frac{32,2}{2480}; 0,04\right) = 0,013$$

Tab.4.349. Hodnoty Y pro všechny varianty výměníku

17 248.4	0,013	TiGr2	0,013
17 348.4	0,013	CuZn20Al2As	0,012
VLX 439	0,013	12 021.1	0,012

Parametr Z :

$$Z = \log\left(\frac{1}{Y}\right) = \log\left(\frac{1}{0,013}\right) = 1,887$$

Tab.4.350. Hodnoty Z pro všechny varianty výměníku

17 248.4	1,887	TiGr2	1,887
17 348.4	1,887	CuZn20Al2As	1,914
VLX 439	1,887	12 021.1	1,927

Parametr X :

$$X = \frac{r}{D_{mitD}} = \frac{477,4[mm]}{3035,6} = 0,157$$

Hodnota X je stejná pro všechny varianty výměníku.

Parametr N :

$$N = 1,006 - \left(\frac{1}{6,2 + (90 \cdot Y)^4}\right) = 1,006 - \left(\frac{1}{6,2 + (90 \cdot 0,013)^4}\right) = 0,882$$

Tab.4.351. Hodnoty N pro všechny varianty výměníku

17 248.4	0,882	TiGr2	0,886
17 348.4	0,882	CuZn20Al2As	0,875
VLX 439	0,882	12 021.1	0,872

Parametr $\beta_{0,1}$:Pro $X = 0,1$

$$\beta_{0,1} = N \cdot (-0,1833 \cdot Z^3 + 1,0383 \cdot Z^2 - 1,2943 \cdot Z + 0,837) =$$

$$= 0,882 \cdot (-0,1833 \cdot 1,887^3 + 1,0383 \cdot 1,887^2 - 1,2943 \cdot 1,887 + 0,837) = 0,758$$

Tab.4.351. Hodnoty $\beta_{0,1}$ pro všechny varianty výměníku

17 248.4	0,758	TiGr2	0,753
17 348.4	0,758	CuZn20Al2As	0,769
VLX 439	0,758	12 021.1	0,774

Parametr $\beta_{0,2}$:Pro $X = 0,2$

$$\beta_{0,2} = \max \left[0,95 \cdot (0,56 - 1,94 \cdot Y - 82,5 \cdot Y^2); 0,5 \right] =$$

$$= \max \left[0,95 \cdot (0,56 - 1,94 \cdot 0,013 - 82,5 \cdot 0,013^2); 0,5 \right] = 0,5$$

Hodnota $\beta_{0,2}$ je stejná pro všechny varianty výměníku.Parametr β_2 :Pro $0,1 < X < 0,2$

$$\beta_2 = 10 \cdot ((0,2 - X) \cdot \beta_{0,1} + (X - 0,1) \cdot \beta_{0,2}) =$$

$$= 10 \cdot ((0,2 - 0,157) \cdot 0,758 + (0,157 - 0,1) \cdot 0,5) = 0,610$$

Tab.4.352. Hodnoty β_2 pro všechny varianty výměníku

17 248.4	0,610	TiGr2	0,608
17 348.4	0,610	CuZn20Al2As	0,615
VLX 439	0,610	12 021.1	0,618

Korozní stav a výpočtová teplotaTlak P_s :

$$P_s = \frac{2 \cdot f_D \cdot z \cdot e_D}{R + 0,5 \cdot e_D} = \frac{2 \cdot 143,333 [MPa] \cdot 1 \cdot 32,2 [mm]}{2480 [mm] + 0,5 \cdot 32,2 [mm]} = 3,698 [MPa]$$

Tab.4.353. Hodnoty P_s pro všechny varianty výměníku [MPa]

17 248.4	3,698	TiGr2	3,820
17 348.4	3,698	CuZn20Al2As	3,475
VLX 439	3,698	12 021.1	3,374

Tlak P_Y :

$$P_Y = \frac{f_D \cdot e_D}{\beta_2 \cdot (0,75 \cdot R + 0,2 \cdot D_{vnitD})} = \frac{143,333[MPa] \cdot 32,2[mm]}{0,610 \cdot (0,75 \cdot 2480[mm] + 0,2 \cdot 3035,6[mm])} = 3,065[MPa]$$

Tab.4.354. Hodnoty P_Y pro všechny varianty výměníku [MPa]

17 248.4	3,065	TiGr2	3,180
17 348.4	3,065	CuZn20Al2As	2,855
VLX 439	3,065	12 021.1	2,760

Tlak P_b :

$$P_b = 111 \cdot f_D \cdot \left(\frac{e_D}{0,75 \cdot R + 0,2 \cdot D_{vnitD}} \right)^{1,5} \cdot \left(\frac{r}{D_{vnitD}} \right)^{0,825} =$$

$$= 111 \cdot 143,333[MPa] \cdot \left(\frac{32,2[mm]}{0,75 \cdot 2480[mm] + 0,2 \cdot 3035,6[mm]} \right)^{1,5} \cdot \left(\frac{477,4[mm]}{3035,6[mm]} \right)^{0,825} = 5,157[MPa]$$

Tab.4.355. Hodnoty P_b pro všechny varianty výměníku [MPa]

17 248.4	5,157	TiGr2	5,422
17 348.4	5,157	CuZn20Al2As	4,688
VLX 439	5,157	12 021.1	4,480

Maximální tlak P_{max} :

$$P_{max} = \min(P_S; P_Y; P_b) = \min(3,698[MPa]; 3,065[MPa]; 5,157[MPa]) = 3,065[MPa]$$

Tab.4.356. Hodnoty P_{max} pro všechny varianty výměníku [MPa]

17 248.4	3,065	TiGr2	3,180
17 348.4	3,065	CuZn20Al2As	2,855
VLX 439	3,065	12 021.1	2,760

Podmínka

$$P_{max} \geq P_T$$

$$3,065[MPa] \geq 2,5[MPa] \quad \text{VYHOVUJE}$$

Podmínka je splněna pro všechny varianty výměníku.

Nekorozní stav a okolní teplotaTlak P_{S20} :

$$P_{S20} = \frac{2 \cdot f_{D20} \cdot z \cdot (e_D + c_D)}{R + 0,5 \cdot (e_D + c_D)} = \frac{2 \cdot 170[MPa] \cdot 1 \cdot (32,2[mm] + 1[mm])}{2480[mm] + 0,5 \cdot (32,2[mm] + 1[mm])} = 4,521[MPa]$$

Tab.4.357. Hodnoty P_{S20} pro všechny varianty výměníku [MPa]

17 248.4	4,521	TiGr2	4,670
17 348.4	4,521	CuZn20Al2As	4,248
VLX 439	4,521	12 021.1	4,124

Tlak P_Y :

$$P_{Y20} = \frac{f_{D20} \cdot (e_D + c_D)}{\beta_2 \cdot (0,75 \cdot R + 0,2 \cdot (D_{vnitD} - 2 \cdot c_D))} =$$

$$= \frac{170[MPa] \cdot (32,2[mm] + 1[mm])}{0,610 \cdot (0,75 \cdot 2480[mm] + 0,2 \cdot (3035,6[mm] - 2 \cdot 1[mm]))} = 3,748[MPa]$$

Tab.4.358. Hodnoty P_{Y20} pro všechny varianty výměníku [MPa]

17 248.4	3,748	TiGr2	3,889
17 348.4	3,748	CuZn20Al2As	3,495
VLX 439	3,748	12 021.1	3,375

Tlak P_{b20} :

$$P_{b20} = 111 \cdot f_{D20} \cdot \left(\frac{e_D + c_D}{0,75 \cdot R + 0,2 \cdot (D_{vnitD} - 2 \cdot c_D)} \right)^{1,5} \cdot \left(\frac{r}{(D_{vnitD} - 2 \cdot c_D)} \right)^{0,825} =$$

$$= 111 \cdot 170[MPa] \cdot \left(\frac{32,2[mm] + 1[mm]}{0,75 \cdot 2480[mm] + 0,2 \cdot (3035,6[mm] - 2 \cdot 1[mm])} \right)^{1,5} \cdot$$

$$\cdot \left(\frac{477,4[mm]}{3035,6[mm] - 2 \cdot 1[mm]} \right)^{0,825} = 5,849[MPa]$$

Tab.4.359. Hodnoty P_{b20} pro všechny varianty výměníku [MPa]

17 248.4	5,849	TiGr2	6,149
17 348.4	5,849	CuZn20Al2As	5,317
VLX 439	5,849	12 021.1	5,080

Maximální tlak P_{max} :

$$P_{max20} = \min(P_S; P_Y; P_b) = \min(4,521[MPa]; 3,748[MPa]; 5,849[MPa]) = 3,748[MPa]$$

Tab.4.360. Hodnoty P_{max} pro všechny varianty výměníku [MPa]

17 248.4	3,748	TiGr2	3,889
17 348.4	3,748	CuZn20Al2As	3,495
VLX 439	3,748	12 021.1	3,375

Podmínka

$$P_{max20} \geq P_T$$

$$3,748[MPa] \geq 2,5[MPa] \quad \text{VYHOVUJE}$$

Podmínka je splněna pro všechny varianty výměníku.

Podmínky platnosti

$$r \leq 0,2 \cdot D_{vniD}$$

$$477,4[mm] \leq 0,2 \cdot 3035,6[mm]$$

$$477,4[mm] \leq 607,12[mm] \quad \text{VYHOVUJE}$$

Podmínka je splněna pro všechny varianty výměníku.

$$r \geq 0,06 \cdot D_{vniD}$$

$$477,4[mm] \geq 0,06 \cdot 3035,6[mm]$$

$$477,4[mm] \geq 182,136[mm] \quad \text{VYHOVUJE}$$

Podmínka je splněna pro všechny varianty výměníku.

$$r \geq 2 \cdot (e_{Dvyp} - c_D - \delta_D)$$

$$477,4[mm] \geq 2 \cdot (26,957[mm] - 1[mm] - 0,8[mm])$$

$$477,4[mm] \geq 50,314[mm] \quad \text{VYHOVUJE}$$

Podmínka je splněna pro všechny varianty výměníku.

$$2 \cdot (e_{Dvyp} - c_D - \delta_D) \leq 0,08 \cdot D_{exD}$$

$$2 \cdot (26,957[mm] - 1[mm] - 0,8[mm]) \leq 0,08 \cdot 3100[mm]$$

$$50,314[mm] \leq 248[mm] \quad \text{VYHOVUJE}$$

Podmínka je splněna pro všechny varianty výměníku.

$$2 \cdot (e_{Dvyp} - c_D - \delta_D) \geq 0,001 \cdot D_{exD}$$

$$2 \cdot (26,957[mm] - 1[mm] - 0,8[mm]) \geq 0,001 \cdot 3100[mm]$$

$$50,314[mm] \geq 3,1[mm] \quad \text{VYHOVUJE}$$

Podmínka je splněna pro všechny varianty výměníku.

$$R \leq D_{exD}$$

$$2480[mm] \leq 3100[mm] \quad \text{VYHOVUJE}$$

Podmínka je splněna pro všechny varianty výměníku.

Požadovaná minimální délka válcového pláště

$$h_1 \geq 0,2 \cdot \sqrt{D_{vniD} \cdot e_D}$$

$$110[mm] \geq 0,2 \cdot \sqrt{3035,6[mm] \cdot 32,2[mm]}$$

$$110[mm] \geq 62,529[mm] \quad \text{VYHOVUJE}$$

Podmínka je splněna pro všechny varianty výměníku.

Navrhovaná tloušťka stěny $e_{Dav} = 34$ mm **VYHOVUJE** zatížení vnitřním tlakem.

4.4.3 Nevztyžené otvory

Maximální průměr nevztyženého otvoru $d = 350\text{mm}$

Tab.4.361. Hodnoty d pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	350	TiGr2	400
17 348.4	350	CuZn20Al2As	300
VLX 439	350	12 021.1	250

Další potřebné parametry:

Platí pro všechny varianty výměníků.

$$r_{is} = R$$

$$Af_b = 0 [\text{mm}^2]$$

napětím zatížená plocha zapuštěného hrdla

$$Ap_\varphi = 0 [\text{mm}^2]$$

tlakem zatížená plocha vlivem šikmě umístěného hrdla pod úhlem φ

$$Af_p = 0 [\text{mm}^2]$$

napětím zatížená plocha vyztužujícího límce

$$Af_w = 0 [\text{mm}^2]$$

napětím zatížená plocha svaru

$$f_b = 0 [\text{MPa}]$$

maximální dovolené napětí materiálu hrdla

$$f_p = 0 [\text{MPa}]$$

maximální dovolené napětí materiálu límce

podmínka:

$$f_b \leq f_s \quad 0 [\text{MPa}] \leq 131,333 [\text{MPa}] \quad \text{VYHOVUJE}$$

$$f_p \leq f_s \quad 0 [\text{MPa}] \leq 131,333 [\text{MPa}] \quad \text{VYHOVUJE}$$

Tato podmínka je splněna pro všechny varianty výměníků.

Parametr l_{so} :

$$l_{so} = \sqrt{(2 \cdot r_{is} + e_D) \cdot e_D} = \sqrt{(2 \cdot 2480 [\text{mm}] + 32,2 [\text{mm}]) \cdot 32,2 [\text{mm}]} = 400,935 [\text{mm}]$$

Tab.4.362. Hodnoty l_{so} pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	400,935	TiGr2	394,458
17 348.4	400,935	CuZn20Al2As	412,585
VLX 439	400,935	12 021.1	419,768

Parametr w :

Graficky změřen v programu AutoCAD.

Tab.4.363. Hodnoty w pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	1075	TiGr2	1008
17 348.4	1075	CuZn20Al2As	1103
VLX 439	1075	12 021.1	1211

podmínka:

$$l_{so} \leq w$$

$$400,935 [\text{mm}] \leq 1075 [\text{mm}] \quad \text{VYHOVUJE}$$

Tato podmínka je splněna pro všechny varianty výměníků.

Parametr r_{ms} :

$$r_{ms} = r_{is} + 0,5 \cdot e_D = 2480[mm] + 0,5 \cdot 32,2[mm] = 2496,1[mm]$$

Tab.4.364. Hodnoty r_{ms} pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	2496,1	TiGr2	2416,1
17 348.4	2496,1	CuZn20Al2As	2656,1
VLX 439	2496,1	12 021.1	2736,1

Parametr δ :

$$\delta = \frac{d}{2 \cdot r_{ms}} = \frac{350[mm]}{2 \cdot 2496,1[mm]} = 0,070$$

Tab.4.365. Hodnoty δ pro všechny varianty výměníku

17 248.4	0,070	TiGr2	0,083
17 348.4	0,070	CuZn20Al2As	0,056
VLX 439	0,070	12 021.1	0,046

Parametr a_p :

$$a_p = r_{ms} \cdot \arcsin(\delta) = 2496,1[mm] \cdot \arcsin(0,070) = 175,144[mm]$$

Tab.4.366. Hodnoty a_p pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	175,144	TiGr2	200,229
17 348.4	175,144	CuZn20Al2As	150,080
VLX 439	175,144	12 021.1	125,044

Plocha Ap_s :

$$Ap_s = 0,5 \cdot r_{is}^2 \cdot \frac{l_{so} + a_p}{0,5 \cdot e_D + r_{is}} = 0,5 \cdot 2480^2[mm^2] \cdot \frac{400,935[mm] + 175,144[mm]}{0,5 \cdot 32,2[mm] + 2480[mm]} = 709729,990[mm^2]$$

Tab.4.367. Hodnoty Ap_s pro všechny varianty výměníku [mm²]

17 248.4	709729,991	TiGr2	708868,790
17 348.4	709729,991	CuZn20Al2As	739528,056
VLX 439	709729,991	12 021.1	736583,208

Plocha Af_D :

$$Af_D = l_{so} \cdot e_D = 400,935[mm] \cdot 32,2[mm] = 12910,106[mm^2]$$

Tab.4.368. Hodnoty Af_D pro všechny varianty výměníku [mm²]

17 248.4	709729,991	TiGr2	708868,790
17 348.4	709729,991	CuZn20Al2As	739528,056
VLX 439	709729,991	12 021.1	736583,208

Plocha Ap_b :

$$Ap_b = \frac{d}{2} \cdot e_D = \frac{350[mm]}{2} \cdot 32,2[mm] = 5635[mm^2]$$

Tab.4.369. Hodnoty Ap_b pro všechny varianty výměníku [mm²]

17 248.4	5635	TiGr2	6440
17 348.4	5635	CuZn20Al2As	4830
VLX 439	5635	12 021.1	4025

Provozní stav:

Zatížení A_1 :

$$\begin{aligned} A_1 &= (Af_D + Af_w) \cdot (f_D - 0,5 \cdot P_T) + Af_p \cdot (f_p - 0,5 \cdot P_T) + Af_b \cdot (f_b - 0,5 \cdot P_T) = \\ &= (12910,106[mm^2] + 0 \cdot [mm^2]) \cdot (143,333[MPa] - 0,5 \cdot 2,5[MPa]) + \\ &+ 0[mm^2] \cdot (0[MPa] - 0,5 \cdot 2,5[MPa]) + 0[mm^2] \cdot (0[MPa] - 0,5 \cdot 2,5[MPa]) = 1834310,841[N] \end{aligned}$$

Tab.4.370. Hodnoty A_1 pro všechny varianty výměníku [N]

17 248.4	1834310,841	TiGr2	1804676,634
17 348.4	1834310,841	CuZn20Al2As	1892187,432
VLX 439	1834310,841	12 021.1	1920471,761

Zatížení A_2 :

$$\begin{aligned} A_2 &= P_T \cdot (Ap_s + Ap_b + 0,5 \cdot Ap_\varphi) = \\ &= 2,5[MPa] \cdot (709729,991[mm^2] + 5635[mm^2] + 0,5 \cdot 0[mm^2]) = 1788412,478[N] \end{aligned}$$

Tab.4.371. Hodnoty A_2 pro všechny varianty výměníku [N]

17 248.4	1788412,478	TiGr2	1788271,980
17 348.4	1788412,478	CuZn20Al2As	1860895,141
VLX 439	1788412,478	12 021.1	1851520,521

Využití:

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{1788412,478}{1834310,841} = 0,975 \leq 1 \quad \text{VYHOVUJE}$$

Tab.4.372. Hodnoty A_2 / A_1 pro všechny varianty výměníku

17 248.4	0,975	TiGr2	0,991
17 348.4	0,975	CuZn20Al2As	0,983
VLX 439	0,975	12 021.1	0,964

Stav při $t = 20^\circ\text{C}$:

Zatížení A_1 :

$$\begin{aligned} A_1 &= (Af_D + Af_w) \cdot (f_{D20} - 0,5 \cdot P_T) + Af_p \cdot (f_p - 0,5 \cdot P_T) + Af_b \cdot (f_b - 0,5 \cdot P_T) = \\ &= (12910,106[mm^2] + 0 \cdot [mm^2]) \cdot (170[MPa] - 0,5 \cdot 2,5[MPa]) + \\ &+ 0[mm^2] \cdot (0[MPa] - 0,5 \cdot 2,5[MPa]) + 0[mm^2] \cdot (0[MPa] - 0,5 \cdot 2,5[MPa]) = 2178580,324[N] \end{aligned}$$

Tab.4.373. Hodnoty A_1 pro všechny varianty výměníku [N]

17 248.4	2178580,324	TiGr2	2143384,272
17 348.4	2178580,324	CuZn20Al2As	2247319,384
VLX 439	2178580,324	12 021.1	2280912,209

Zatížení A_2 :

$$A_2 = P_T \cdot (Ap_s + Ap_b + 0,5 \cdot Ap_\phi) =$$

$$= 2,5 [MPa] \cdot (709729,991 [mm^2] + 5635 [mm^2] + 0,5 \cdot 0 [mm^2]) = 1788412,478 [N]$$

Tab.4.374. Hodnoty A_2 pro všechny varianty výměníku [N]

17 248.4	1788412,478	TiGr2	1788271,980
17 348.4	1788412,478	CuZn20Al2As	1860895,141
VLX 439	1788412,478	12 021.1	1851520,521

Využití:

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{1788412,478}{2178580,324} = 0,821 \leq 1 \quad \text{VYHOVUJE}$$

Tab.4.375. Hodnoty A_2 / A_1 pro všechny varianty výměníku

17 248.4	0,821	TiGr2	0,834
17 348.4	0,821	CuZn20Al2As	0,828
VLX 439	0,821	12 021.1	0,812

Nevyztužený otvor o maximálním průměru d viz. Tab.4.361. **VYHOVUJE.**

Rozměry hrdla pro servisní průřezy o vnitřním průměru $d_{vnit} = 550 \text{ mm}$ i s uvažováním tloušťky stěny hrdla **NEVYHOVUJÍ** rozměrům nevyztuženého otvoru v plášti dna d a proto je nutné vyztužit otvor vsazeným hrdlem.

4.4.4 Vyztužení otvoru vsazeným hrdlem a výztužným límcem

Materiál pláště hrdla: P265GH EN 10028 – 2 (výp. teplota $t_T = 150^\circ\text{C}$)

Průměrná tloušťka pláště hrdla v místě spoje e_{bav} : $e_{bav} = 15 \text{ mm}$

Mez kluzu R_{eH} pro tloušťku výrobku $t \leq 16 \text{ mm}$ z tabulek: $R_{eH} = 265 \text{ MPa}$

Minimální hodnota meze kluzu 0,2% $R_{p0,2t}$ pro teplotu $t_T = 150^\circ\text{C}$ a tloušťku výrobku $t \leq 16 \text{ mm}$ z tabulek:

$$R_{p0,2t} = 223 \text{ MPa}$$

Mez pevnosti v tahu R_m pro tloušťku výrobku $t \leq 16 \text{ mm}$ z tabulek: $R_m = 410 \text{ MPa}$

Vnější průměr pláště D_{exb} : $D_{exb} = 570 \text{ mm}$

Úbytek koroze pláště hrdla c_b : $c_b = 1 \text{ mm}$

Dolní úchylka tloušťky δ_b : $\delta_b = 0,6 \text{ mm}$

Analyzovaná tloušťka pláště e_b :

$$e_b = e_{bav} - c_b - \delta_b = 15[mm] - 1[mm] - 0,6[mm] = 13,4[mm]$$

Vnitřní průměr pláště D_{vnitb} :

$$D_{vnitb} = D_{exb} - 2 \cdot e_b = 570[mm] - 2 \cdot 13,4[mm] = 543,2[mm]$$

Dovolená namáhání pláště hrdla f_b :

$$f_b = \text{menší } z \left(\frac{R_{p0,2}}{1,5} < \frac{R_m}{2,4} \right) = \text{menší } z \left(\frac{223[MPa]}{1,5} < \frac{410[MPa]}{2,4} \right) = 148,667[MPa]$$

Dovolená namáhání pláště pro okolní teplotu f_{b20} :

$$f_{b20} = \text{menší } z \left(\frac{R_{eH}}{1,5} < \frac{R_m}{2,4} \right) = \text{menší } z \left(\frac{265[MPa]}{1,5} < \frac{410[MPa]}{2,4} \right) = 176,667[MPa]$$

Součinitel z : $z = 1 \text{ mm}$

Délka vnější části hrdla skořepiny l_b : $l_b = 100 \text{ mm}$

Délka vnitřní části hrdla l_{bi} : $l_{bi} = 20 \text{ mm}$

Vzdálenost mezi otvorem a diskontinuitou skořepiny w : $w = 100 \text{ mm}$

Materiál výztužného límce: P265GH EN 10028 – 2 (výp. teplota $t_T = 150^\circ\text{C}$)

Průměrná tloušťka pláště hrdla v místě spoje e_{bav} : $e_{bav} = 25 \text{ mm}$

Mez kluzu R_{eH} pro tloušťku výrobku $16 < t \leq 40 \text{ mm}$ z tabulek: $R_{eH} = 255 \text{ MPa}$

Minimální hodnota meze kluzu $0,2\% R_{p0,2t}$ pro teplotu $t_T = 150^\circ\text{C}$ a tloušťku výrobku $16 < t \leq 40 \text{ mm}$ z tabulek:

$$R_{p0,2t} = 215 \text{ MPa}$$

Mez pevnosti v tahu R_m pro tloušťku výrobku $16 < t \leq 40 \text{ mm}$ z tabulek: $R_m = 410 \text{ MPa}$

Dovolená namáhání límce f_p :

$$f_p = \text{menší } z \left(\frac{R_{p0,2}}{1,5} < \frac{R_m}{2,4} \right) = \text{menší } z \left(\frac{215[MPa]}{1,5} < \frac{410[MPa]}{2,4} \right) = 143,333[MPa]$$

Dovolená namáhání límce pro okolní teplotu f_{p20} :

$$f_{p20} = \text{menší } z \left(\frac{R_{eH}}{1,5} < \frac{R_m}{2,4} \right) = \text{menší } z \left(\frac{255[MPa]}{1,5} < \frac{410[MPa]}{2,4} \right) = 170[MPa]$$

Šířka výztužného límce l_p : $l_p = 200 \text{ mm}$

Podmínky platnosti:

$$\frac{D_{vnitb}}{2 \cdot r_{is}} \leq 1$$

$$\frac{543,2[mm]}{2 \cdot 2480[mm]} \leq 1$$

$$0,110 \leq 1 \quad \text{VYHOVUJE}$$

Tab.4.376. Hodnoty $D_{vnitb} / 2r_{is}$ pro všechny varianty výměníku

17 248.4	0,110	TiGr2	0,113
17 348.4	0,110	CuZn20Al2As	0,103
VLX 439	0,110	12 021.1	0,100

$$\frac{D_{exb}}{D_{exD}} \leq 0,6$$

$$\frac{570[mm]}{3100[mm]} \leq 0,6$$

$$0,184 \leq 1 \quad \text{VYHOVUJE}$$

Tab.4.377. Hodnoty D_{exb} / D_{exD} pro všechny varianty výměníku

17 248.4	0,184	TiGr2	0,190
17 348.4	0,184	CuZn20Al2As	0,173
VLX 439	0,184	12 021.1	0,168

Další potřebné parametry:

$Ap_{\varphi} = 0 [mm^2]$ tlakem zatížená plocha vlivem šikmě umístěného hrdla pod úhlem φ
 $Af_w = 0 [mm^2]$ napětím zatížená plocha svaru

$f_b = 143,333[MPa]$ maximální dovolené napětí materiálu hrdla
 $f_p = 143,333[MPa]$ maximální dovolené napětí materiálu límce

Podmínka:

$$f_b \leq f_C \quad 143,333[MPa] \leq 143,333[MPa] \quad \text{VYHOVUJE}$$

$$f_p \leq f_C \quad 143,333[MPa] \leq 143,333[MPa] \quad \text{VYHOVUJE}$$

Podmínka:

$$e_{ap} \leq 1,5 \cdot e_{Ca}$$

$$25[mm] \leq 1,5 \cdot 32,2[mm]$$

$$25[mm] \leq 48,3[mm] \quad \text{VYHOVUJE}$$

Podmínky VYHOVUJÍ všechny varianty výměníku.

Maximální vyztužující délka vnější části hrdla l_{bo} :

$$l_{bo} = \sqrt{(D_{exb} - e_b) \cdot e_b} = \sqrt{(570[mm] - 13,4[mm]) \cdot 13,4[mm]} = 86,362[mm]$$

Hodnoty l_{bo} hrdla jsou pro ostatní varianty výměníku stejné.

Parametr l_{so} :

$$l_{so} = \sqrt{(2 \cdot r_{is} + e_D) \cdot e_D} =$$

$$= \sqrt{(2 \cdot 2480[mm] + 32,2[mm]) \cdot 32,2[mm]} = 400,935[mm]$$

Tab.4.378. Hodnoty l_{so} pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	400,935	TiGr2	394,458
17 348.4	400,935	CuZn20Al2As	413,585
VLX 439	400,935	12 021.1	419,768

Efektivní vyztužující délka vnější části hrdla l_b' :

$$l_b' = \min(l_b; l_{bo}) = \min(100[mm]; 86,362[mm]) = 86,362[mm]$$

Hodnoty l_b' hrdla jsou pro ostatní varianty výměníku stejné.Efektivní vyztužující délka vnitřní části hrdla l_{bi}' :

$$l_{bi}' = \min(l_{bi}; 0,5 \cdot l_{bo}) = \min(20[mm]; 0,5 \cdot 86,362[mm]) = 20[mm]$$

Hodnoty l_{bi}' hrdla jsou pro ostatní varianty výměníku stejné.Délka skořepiny mezi otvorem a diskontinuitou l_s : $l_s = w = 100mm$ Hodnoty l_s hrdla jsou pro ostatní varianty stejné.Efektivní vyztužující délka skořepiny l_s' :

$$l_s' = \min(l_s; l_{so}) = \min(100[mm]; 400,935[mm]) = 100[mm]$$

Hodnoty l_s' hrdla jsou pro ostatní varianty výměníku stejné.Efektivní vyztužující šířka výztužného límce l_p' :

$$l_p' = \min(l_p; l_{so}) = \min(200[mm]; 400,935[mm]) = 200[mm]$$

Hodnoty l_p' hrdla jsou pro ostatní varianty výměníku stejné.**Podmínka:**

$$D_{exb} \leq 0,15 \cdot \sqrt{(2 \cdot r_{is} + e_D) \cdot e_D}$$

$$543,2[mm] \leq 0,15 \cdot \sqrt{(2 \cdot 2480[mm] + 32,2[mm]) \cdot 32,2[mm]}$$

$$543,2[mm] \leq 60,140[mm]$$

NEVYHOVUJE – nejedná se o malý otvor

Podmínce NEVYHOVUJÍ všechny varianty výměníku.

Podmínka:

$$w \leq l_{so}$$

$$100[mm] \leq 400,934[mm] \quad \text{VYHOVUJE}$$

Podmínce VYHOVUJÍ všechny varianty výměníku.

Podmínka:

$$w \geq w_{\min}$$

$$100[mm] \geq 96,6[mm] \quad \text{VYHOVUJE}$$

Podmínka splněna pro všechny varianty výměníku.

Příčný řez

Parametr r_{ms} :

$$r_{ms} = r_{is} + 0,5 \cdot e_D = 2480[mm] + 0,5 \cdot 32,2[mm] = 2496,1[mm]$$

Tab.4.379. Hodnoty r_{ms} pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	2496,1	TiGr2	2416,1
17 348.4	2496,1	CuZn20Al2As	2656,1
VLX 439	2496,1	12 021.1	2736,1

Parametr δ :

$$\delta = \frac{D_{exb}}{2 \cdot r_{ms}} = \frac{570[mm]}{2 \cdot 2496,1[mm]} = 0,114$$

Tab.4.380. Hodnoty δ pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	0,114	TiGr2	0,118
17 348.4	0,114	CuZn20Al2As	0,107
VLX 439	0,114	12 021.1	0,104

Parametr a_p :

$$a_p = r_{ms} \cdot \arcsin(\delta) = 2496,1[mm] \cdot \arcsin(0,114) = 285,623[mm]$$

Tab.4.381. Hodnoty a_p pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	285,623	TiGr2	285,665
17 348.4	285,623	CuZn20Al2As	285,550
VLX 439	285,623	12 021.1	285,518

Plocha Ap_s :

$$Ap_s = 0,5 \cdot r_{is}^2 \cdot \frac{l'_s + a_p}{0,5 \cdot e_D + r_{is}} = 0,5 \cdot 2480^2 [mm^2] \cdot \frac{100[mm] + 285,623[mm]}{0,5 \cdot 32,2[mm] + 2480[mm]} = 475088,157 [mm^2]$$

Tab.4.382. Hodnoty Ap_s pro všechny varianty výměníku [mm²]

17 248.4	475088,157	TiGr2	459714,204
17 348.4	475088,157	CuZn20Al2As	505840,789
VLX 439	475088,157	12 021.1	521219,190

Plocha Af_s :

$$Af_s = l'_s \cdot e_D = 100[mm] \cdot 32,2[mm] = 3220 [mm^2]$$

Hodnoty Af_s hrdla jsou pro ostatní varianty výměníku stejné.

Plocha Af_p :

$$Af_p = l_p' \cdot e_p = 200[mm] \cdot 25[mm] = 5000[mm^2]$$

Hodnoty Af_p hrdla jsou pro ostatní varianty výměníku stejné.

Plocha Af_b :

$$Af_b = (l_b' + l_{bi}' + e_{cs}) \cdot e_b = (86,362[mm] + 20[mm] + 32,2[mm]) \cdot 22,4[mm] = 1856,734[mm^2]$$

Hodnoty Af_p hrdla jsou pro ostatní varianty výměníku stejné.

Plocha Ap_b :

$$Ap_b = \frac{D_{vnitb}}{2} \cdot (e_D + l_b') = \frac{543,2[mm]}{2} \cdot (32,2[mm] + 86,362[mm]) = 32201,510[mm^2]$$

Hodnoty Ap_b hrdla jsou pro ostatní varianty výměníku stejné.

Provozní stav:

Zatížení A_1 :

$$\begin{aligned} A_1 &= (Af_D + Af_w) \cdot (f_D - 0,5 \cdot P_T) + Af_p \cdot (f_p - 0,5 \cdot P_T) + Af_b \cdot (f_b - 0,5 \cdot P_T) = \\ &= (3220[mm^2] + 0[mm^2]) \cdot (143,333[MPa] - 0,5 \cdot 2,5[MPa]) + \\ &+ 5000[mm^2] \cdot (143,333[MPa] - 0,5 \cdot 2,5[MPa]) + \\ &+ 1856,734[mm^2] \cdot (143,333[MPa] - 0,5 \cdot 2,5[MPa]) = 1431734,330[N] \end{aligned}$$

Hodnoty A_1 hrdla jsou pro ostatní varianty výměníku stejné.

Zatížení A_2 :

$$\begin{aligned} A_2 &= P_T \cdot (Ap_s + Ap_b + 0,5 \cdot Ap_\phi) = \\ &= 2,5[MPa] \cdot (4750888,157[mm^2] + 32301,510[mm^2] + 0,5 \cdot 0[mm^2]) = 1268224,166[N] \end{aligned}$$

Tab.4.383. Hodnoty A_2 pro všechny varianty výměníku [N]

17 248.4	1268224,166	TiGr2	1229789,284
17 348.4	1268224,166	CuZn20Al2As	1345105,748
VLX 439	1268224,166	12 021.1	1383551,751

Využití:

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{1268224,166}{1431734,330} = 0,886 \leq 1 \quad \text{VYHOVUJE}$$

Tab.4.384. Hodnoty A_2 / A_1 pro všechny varianty výměníku [N]

17 248.4	0,886	TiGr2	0,859
17 348.4	0,886	CuZn20Al2As	0,939
VLX 439	0,886	12 021.1	0,966

Stav při $t = 20^\circ\text{C}$:

Zatížení A_1 :

$$A_1 = (Af_D + Af_w) \cdot (f_{D20} - 0,5 \cdot P_T) + Af_p \cdot (f_{p20} - 0,5 \cdot P_T) + Af_b \cdot (f_{b20} - 0,5 \cdot P_T) =$$

$$= (3220 [\text{mm}^2] + 0 [\text{mm}^2]) \cdot (170 [\text{MPa}] - 0,5 \cdot 2,5 [\text{MPa}]) +$$

$$+ 5000 [\text{mm}^2] \cdot (170 [\text{MPa}] - 0,5 \cdot 2,5 [\text{MPa}]) +$$

$$+ 1856,734 [\text{mm}^2] \cdot (170 [\text{MPa}] - 0,5 \cdot 2,5 [\text{MPa}]) = 1700448,911 [\text{N}]$$

Hodnoty A_1 jsou pro ostatní varianty výměníku stejné.

Zatížení A_2 :

$$A_2 = P_T \cdot (Ap_s + Ap_b + 0,5 \cdot Ap_\varphi) =$$

$$= 2,5 [\text{MPa}] \cdot (475088,157 [\text{mm}^2] + 32201,510 [\text{mm}^2] + 0,5 \cdot 0 [\text{mm}^2]) = 1268224,166 [\text{N}]$$

Tab.4.385. Hodnoty A_2 pro všechny varianty výměníku [N]

17 248.4	1268224,166	TiGr2	1229789,284
17 348.4	1268224,166	CuZn20Al2As	1345105,748
VLX 439	1268224,166	12 021.1	1383551,751

Využití:

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{1268224,166}{1700448,911} = 0,746 \leq 1 \quad \text{VYHOVUJE}$$

Tab.4.386. Hodnoty A_2 / A_1 pro všechny varianty výměníku [N]

17 248.4	0,746	TiGr2	0,723
17 348.4	0,746	CuZn20Al2As	0,791
VLX 439	0,746	12 021.1	0,814

Maximální zatěžující tlak P_{\max} :

$$P_{\max} \geq P$$

$$P_{\max} = \frac{(Af_D + Af_w) \cdot f_D + Af_b \cdot f_b + Af_p \cdot f_p}{(Ap_s + Ap_b + 0,5 \cdot Ap_\varphi) + 0,5 \cdot (Af_D + Af_w + Af_b + Af_p)} =$$

$$= \frac{(3220 [\text{mm}^2] + 0 [\text{mm}^2]) \cdot 143,333 [\text{MPa}] + 1856,734 [\text{mm}^2] \cdot 143,333 [\text{MPa}] + 5000 [\text{mm}^2] \cdot 143,333 [\text{MPa}]}{(459714,204 [\text{mm}^2] + 32201,510 [\text{mm}^2] + 0) + 0,5 \cdot (3220 [\text{mm}^2] + 0 + 1856,734 [\text{mm}^2] + 5000 [\text{mm}^2])} =$$

$$= 2,819 [\text{MPa}]$$

$$2,819 [\text{MPa}] \geq 2,5 [\text{MPa}] \quad \text{VYHOVUJE}$$

Tab.4.387. Hodnoty P_{\max} pro všechny varianty výměníku [MPa]

17 248.4	2,819	TiGr2	2,906
17 348.4	2,819	CuZn20Al2As	2,660
VLX 439	2,819	12 021.1	2,586

Vyztužený otvor o maximálním průměru $d = 570 \text{ mm}$ **VYHOVUJE** provoznímu zatížení.

Maximální rozměr vyztuženého otvoru v plášti vodní komory $d = 570 \text{ mm}$ **VYHOVUJE** rozměrům hrdla pro servisní průřezy $D_{vnitb} = 550 \text{ mm}$ s uvažováním tlouštěk stěn hrdla.

4.5 Vstupní / výstupní hrdla na straně vody

dle: **ČSN EN 13445 – 3 – 7.4**

4.5.1 Vlastnosti materiálu, volba základních rozměrů komponenty

Pro všechny varianty výměníku jsou parametry vstupních / výstupních hrdel stejné.

Materiál pláště hrdla: P265GH EN 10028 – 2 (výp. teplota $t_T = 150^\circ\text{C}$)

Průměrná tloušťka pláště hrdla e_{bav} : $e_{bav} = 15 \text{ mm}$

Mez kluzu R_{eH} pro tloušťku výrobku $t \leq 16 \text{ mm}$ z tabulek: $R_{eH} = 265 \text{ MPa}$

Minimální hodnota meze kluzu $0,2\% R_{p0,2t}$ pro teplotu $t_T = 150^\circ\text{C}$ a tloušťku výrobku $t \leq 16 \text{ mm}$ z tabulek:

$$R_{p0,2t} = 223 \text{ MPa}$$

Mez pevnosti v tahu R_m pro tloušťku výrobku $t \leq 16 \text{ mm}$ z tabulek: $R_m = 410 \text{ MPa}$

Modul pružnosti E pro teplotu $t_T = 150^\circ\text{C}$ z tabulek: $E = 196000 \text{ MPa}$

Poissonova konstanta pro plášť hrdla ν : $\nu = 0,3$

Vnější průměr pláště D_{exb} : $D_{exb} = 1230 \text{ mm}$

Úbytek koroze pláště hrdla c_b : $c_b = 1 \text{ mm}$

Dolní úchylka tloušťky δ_b : $\delta_b = 0,5 \text{ mm}$

Analyzovaná tloušťka pláště e_b :

$$e_b = e_{bav} - c_b - \delta_b = 15 [\text{mm}] - 1 [\text{mm}] - 0,5 [\text{mm}] = 13,5 [\text{mm}]$$

Vnitřní průměr pláště D_{vnitb} :

$$D_{vnitb} = D_{exb} - 2 \cdot e_{bH} = 1230 [\text{mm}] - 2 \cdot 13,5 [\text{mm}] = 1203 [\text{mm}]$$

Dovolená namáhání pláště f_b :

$$f_b = \text{menší } z \left(\frac{R_{p0,2}}{1,5} < \frac{R_m}{2,4} \right) = \text{menší } z \left(\frac{223 [\text{MPa}]}{1,5} < \frac{410 [\text{MPa}]}{2,4} \right) = 148,667 [\text{MPa}]$$

Dovolená namáhání pláště pro okolní teplotu f_{b20} :

$$f_{b20} = \text{menší } z \left(\frac{R_{eH}}{1,5} < \frac{R_m}{2,4} \right) = \text{menší } z \left(\frac{265 [\text{MPa}]}{1,5} < \frac{410 [\text{MPa}]}{2,4} \right) = 176,667 [\text{MPa}]$$

Součinitel z : $z = 0,85 \text{ mm}$

4.5.2 Výpočet

(výp. teplota $t_T = 150^\circ\text{C}$)

Požadovaná tloušťka stěny hrdla e :

$$e = \frac{P_T \cdot D_{\text{exb}}}{2 \cdot f_b \cdot z + P_T} = \frac{2,5 [\text{MPa}] \cdot 1230 [\text{mm}]}{2 \cdot 148,667 [\text{MPa}] \cdot 1 + 2,5 [\text{MPa}]} = 12,048 [\text{mm}]$$

Využití e/e_{bav} :

$$\frac{e}{e_{\text{bav}}} = \frac{12,048 [\text{mm}]}{15 [\text{mm}]} = 0,803 \leq 1 \quad \text{VYHOVUJE}$$

Střední průměr pláště trubky D_m :

$$D_m = \frac{D_{\text{exb}} + D_{\text{vntb}}}{2} = \frac{1230 [\text{mm}] + 1203 [\text{mm}]}{2} = 1216,5 [\text{mm}]$$

Korozní stav a výpočtová teplota

$$P_{\text{max}} \geq P_T$$

$$P_{\text{max}} = \frac{2 \cdot f_b \cdot z \cdot e_b}{D_m} = \frac{2 \cdot 148,667 [\text{MPa}] \cdot 0,85 \cdot 13,5 [\text{mm}]}{1216,5 [\text{mm}]} = 2,805 [\text{MPa}] \geq 2,5 [\text{MPa}] \quad \text{VYHOVUJE}$$

Nekorozní stav a okolní teplota

$$P_{\text{max}20} \geq P_T$$

$$P_{\text{max}20} = \frac{2 \cdot f_{b20} \cdot z \cdot (e_b + c_b)}{D_m} = \frac{2 \cdot 176,667 [\text{MPa}] \cdot 0,85 \cdot (13,5 [\text{mm}] + 1 [\text{mm}])}{1216,5 [\text{mm}]} = 3,461 [\text{MPa}] \geq 2,5 [\text{MPa}] \quad \text{VYHOVUJE}$$

Podmínka platnosti

$$\frac{e}{D} \leq 0,16$$

$$\frac{12,048 [\text{mm}]}{1230 [\text{mm}]} \leq 0,16$$

$$0,010 \leq 0,16 \quad \text{VYHOVUJE}$$

Tloušťka stěny pláště hrdla **VYHOVUJE** zatížení vnitřním tlakem.

4.6 Trubky

dle: **ČSN EN 13445 – 3 – 7.4, 8.4**

4.6.1 Vlastnosti materiálu, volba základních rozměrů komponenty

Detailně jsou popsány parametry pro materiál 17 248.4, pro zbylé materiály jsou uvedeny v tabulce.

(výp. teplota $t_T = 150^\circ\text{C}$)

Minimální hodnota meze kluzu 1,0% $R_{p1,0}$: z tabulek pro tloušťku do 10mm

$$R_{p1,0} = 245\text{MPa}$$

Tab.4.388. Hodnoty $R_{p1,0}$ pro všechny materiály [MPa] podle jednotlivých norem

17 248.4	CSN 41 7248	245	TiGr2	DIN 17 861	270
17 348.4	CSN 41 7348	265	CuZn20Al2As	AD – Merkblatt W6/2	130
VLX 439	UNS S43035	270	12 021.1	CSN 41 2021	235

Mez pevnosti v tahu R_m pro tloušťku výrobku do 10mm z tabulek: $R_m = 500\text{ MPa}$

Tab.4.389. Hodnoty R_m pro všechny materiály [MPa] podle jednotlivých norem

17 248.4	CSN 41 7248	500	TiGr2	DIN 17 861	390
17 348.4	CSN 41 7348	500	CuZn20Al2As	AD – Merkblatt W6/2	340
VLX 439	UNS S43035	450	12 021.1	CSN 41 2021	340

Minimální hodnota meze kluzu 1,0% $R_{p1,0t}$ pro teplotu $t_T = 150^\circ\text{C}$ z tabulek pro průměr tyčí do 100mm:

$$R_{p1,0t} = 195\text{ MPa}$$

Tab.4.390. Hodnoty $R_{p1,0t}$ pro všechny materiály [MPa] podle jednotlivých norem

17 248.4	CSN 41 7248	195	TiGr2	DIN 17 861	195
17 348.4	CSN 41 7348	205	CuZn20Al2As	AD – Merkblatt W6/2	125
VLX 439	UNS S43035	215	12 021.1	CSN 41 2021	192

Minimální hodnota meze kluzu 0,2% $R_{p0,2t}$ pro teplotu $t_T = 150^\circ\text{C}$

$$R_{p0,2t} = 165\text{ MPa}$$

Tab.4.391. Hodnoty $R_{p0,2t}$ pro všechny materiály [MPa] podle jednotlivých norem

17 248.4	CSN 41 7248	165	TiGr2	DIN 17 861	250
17 348.4	CSN 41 7348	176	CuZn20Al2As	AD – Merkblatt W6/2	120
VLX 439	UNS S43035	243	12 021.1	CSN 41 2021	163

Modul pružnosti E pro teplotu $t_T = 150^\circ\text{C}$ z tabulek: $E = 190000 \text{ MPa}$

Tab.4.392. Hodnoty E pro všechny materiály [MPa] podle jednotlivých norem

17 248.4	CSN 41 7248	190 000	TiGr2	DIN 17 861	103 000
17 348.4	CSN 41 7348	190 000	CuZn20Al2As	AD – Merkblatt W6/2	107 000
VLX 439	UNS S43035	192 500	12 021.1	CSN 41 2021	195 000

Vnější průměr trubky d_T : $d_T = 20 \text{ mm}$

Hodnoty d_T trubek jsou pro ostatní varianty výměníku stejné.

Tloušťka stěny trubky e_{Tav} : $e_{Tav} = 1 \text{ mm}$

Tab.4.393. Hodnoty e_{Tav} pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	1	TiGr2	0,7
17 348.4	1	CuZn20Al2As	1,5
VLX 439	1	12 021.1	1,5

Dolní úchylka tloušťky δ_T : $\delta_T = 0,1 \text{ mm}$

Hodnoty δ_T trubek jsou pro ostatní varianty výměníku stejné.

Součinitel z : $z = 1 \text{ mm}$

Hodnoty z trubek jsou pro ostatní varianty výměníku stejné.

Analyzovaná tloušťka stěny trubky e_T : $e_T = e_{Tav} - \delta_T = 1[\text{mm}] - 0,1[\text{mm}] = 0,9[\text{mm}]$

Tab.4.394. Hodnoty e_T pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	0,9	TiGr2	0,6
17 348.4	0,9	CuZn20Al2As	1,4
VLX 439	0,9	12 021.1	1,4

Vnitřní průměr trubky d_{Tvnit} : $d_{Tvnit} = d_T - 2 \cdot e_T = 20[\text{mm}] - 0,9[\text{mm}] = 18,2[\text{mm}]$

Tab.4.395. Hodnoty d_{Tvnit} pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	18,2	TiGr2	18,8
17 348.4	18,2	CuZn20Al2As	17,2
VLX 439	18,2	12 021.1	17,2

Dovolené namáhání pro trubky f_T :

$$f_T = \left(\frac{R_{p1,0t}}{1,5} \right) = \left(\frac{195[\text{MPa}]}{1,5} \right) = 130[\text{MPa}]$$

Tab.4.396. Hodnoty f_T pro všechny varianty výměníku [MPa]

17 248.4	130	TiGr2	130
17 348.4	136,667	CuZn20Al2As	83,333
VLX 439	143,333	12 021.1	128

4.6.2 Výpočet

4.6.2.1 Zatížení vnitřním tlakem

Všechny parametry budou vypočteny detailně pro variantu 17 248.4, pro ostatní varianty výměníku budou uvedeny výsledky v tabulce.

Požadovaná tloušťka stěny trubky e :

$$e = \frac{P_{s1} \cdot D_{exs}}{2 \cdot f_s \cdot z + P} = \frac{2,5 [MPa] \cdot 20 [mm]}{2 \cdot 130 [MPa] \cdot 1 + 2,5 [MPa]} = 0,190 [mm]$$

Tab.4.397. Hodnoty e pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	0,190	TiGr2	0,190
17 348.4	0,181	CuZn20Al2As	0,296
VLX 439	0,173	12 021.1	0,193

Využití e/e_{sav} :

$$\frac{e}{e_{sav}} = \frac{0,190 [mm]}{1 [mm]} = 0,190 \leq 1 \quad \text{VYHOVUJE}$$

Tab.4.398. Hodnoty e/e_{sav} pro všechny varianty výměníku

17 248.4	0,190	TiGr2	0,272
17 348.4	0,181	CuZn20Al2As	0,197
VLX 439	0,173	12 021.1	0,129

Střední průměr pláště trubky D_m :

$$D_m = D_T - e_{Tav} - \delta_T = 20 [mm] - 1 [mm] - 0,1 [mm] = 18,9 [mm]$$

Tab.4.399. Hodnoty D_m pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	18,9	TiGr2	19,2
17 348.4	18,9	CuZn20Al2As	18,4
VLX 439	18,9	12 021.1	18,4

Korozní stav a výpočtová teplota

$$P_{\max} \geq P_T$$

$$P_{\max} = \frac{2 \cdot f_T \cdot z \cdot e_T}{D_m} =$$

$$= \frac{2 \cdot 130 [MPa] \cdot 1 \cdot 0,9 [mm]}{18,9 [mm]} = 12,381 [MPa] \geq 2,5 [MPa] \quad \text{VYHOVUJE}$$

Tab.4.400. Hodnoty P_{max} pro všechny varianty výměníku [MPa]

17 248.4	12,381	TiGr2	8,125
17 348.4	13,016	CuZn20Al2As	12,681
VLX 439	13,651	12 021.1	19,478

Nekorozní stav a okolní teplota

$$P_{max20} \geq P_T$$

$$P_{max20} = \frac{2 \cdot f_{T20} \cdot z \cdot e_T}{D_m} =$$

$$= \frac{2 \cdot 163,333 [MPa] \cdot 1 \cdot 0,9 [mm]}{18,9 [mm]} = 15,556 [MPa] \geq 2,5 [MPa] \quad \text{VYHOVUJE}$$

Tab.4.401. Hodnoty P_{max20} pro všechny varianty výměníku [MPa]

17 248.4	15,556	TiGr2	11,250
17 348.4	16,825	CuZn20Al2As	13,188
VLX 439	17,14	12 021.1	23,841

Podmínka platnosti

$$\frac{e}{D} \leq 0,16$$

$$\frac{0,190 [mm]}{20 [mm]} \leq 0,16$$

$$0,010 \leq 0,16 \quad \text{VYHOVUJE}$$

Tab.4.402. Hodnoty e/D pro všechny varianty výměníku

17 248.4	0,010	TiGr2	0,010
17 348.4	0,009	CuZn20Al2As	0,015
VLX 439	0,009	12 021.1	0,010

Tloušťka stěny pláště trubky **VYHOVUJE** zatížení vnitřním tlakem.

4.6.2.2 Zatížení vnějším tlakem

Dovolená elastická mezní hodnota σ_e :

$$\sigma_e = \frac{Rp0,1t}{1,3} = \frac{195 [MPa]}{1,3} = 150 [MPa]$$

Tab.4.403. Hodnoty σ_e pro všechny varianty výměníku [MPa]

17 248.4	150	TiGr2	150
17 348.4	157,692	CuZn20Al2As	96,154
VLX 439	165,38	12 021.1	147,692

Minimální součinitel bezpečnosti S : $S = 1,5$

Hodnoty S pláště trubek jsou pro ostatní varianty výměníku stejné.

Nevyztužená délka L :

$$L = L_{cyl} + 0,4 \cdot h' + 0,4 \cdot h''$$

kde:

$$\begin{array}{lll} L_{cyl} & \text{délka válcového pláště} & L_{cyl} = L_{tr} \\ h, h'' & \text{vnější výška klenutí den} & h, h'' = 0 \text{ mm} \end{array}$$

$$L = L_{cyl} + 0,4 \cdot h' + 0,4 \cdot h'' = 5760 [mm] + 0,4 \cdot 0 [mm] + 0,4 \cdot 0 [mm] = 5760 [mm]$$

Tab.4.404. Hodnoty L pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	5760	TiGr2	5150
17 348.4	5760	CuZn20Al2As	4180
VLX 439	4980	12 021.1	4250

Tloušťka stěny válcového pláště trubky

a) tlak při kterém střední obvodové napětí dosáhne meze kluzu P_y :

hodnota R :

$$R = (d_T / 2) - (e_{Tav} / 2) = (20 [mm] / 2) - (1 [mm] / 2) = 9,5 [mm]$$

Tab.4.405. Hodnoty R pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	9,5	TiGr2	9,65
17 348.4	9,5	CuZn20Al2As	9,25
VLX 439	9,5	12 021.1	9,25

Pak tlak:

$$P_y = \frac{\sigma_e \cdot e_T}{R} = \frac{\sigma_e \cdot e_T}{R} = \frac{2 \cdot 150 [MPa] \cdot 0,9 [mm]}{9,5 [mm]} = 14,211 [MPa]$$

Tab.4.406. Hodnoty P_y pro všechny varianty výměníku [MPa]

17 248.4	14,211	TiGr2	9,326
17 348.4	14,939	CuZn20Al2As	14,553
VLX 439	15,668	12 021.1	22,353

b) teoretický tlak při elastické ztrátě stability P_m :

potřebné parametry:

počet vln po obvodě trubky n_{cyl} :

hodnota $L/2R$:

$$\frac{L}{2 \cdot R} = \frac{5760 [mm]}{2 \cdot 9,5 [mm]} = 303,158$$

Tab.4.407. Hodnoty $L/2R$ pro všechny varianty výměníku

17 248.4	303,158	TiGr2	266,839
17 348.4	303,158	CuZn20Al2As	225,946
VLX 439	262,105	12 021.1	229,730

Parametr $e_s/2R$:

$$\frac{e_r}{2 \cdot R} = \frac{0,9[mm]}{2 \cdot 9,5[mm]} = 0,047$$

Tab.4.408. Hodnoty $e_s/2R$ pro všechny varianty výměníku

17 248.4	0,047	TiGr2	0,031
17 348.4	0,047	CuZn20Al2As	0,076
VLX 439	0,047	12 021.1	0,076

Z grafu.8.5 – 4 této normy se určí hodnota n_{cyl} : $n_{cyl} = 2$ Hodnoty n_{cyl} trubky jsou pro ostatní varianty výměníku stejné.Parametr Z :

$$Z = \frac{\pi \cdot R}{L} = \frac{\pi \cdot 9,5[mm]}{5760[mm]} = 0,005$$

Tab.4.409. Hodnoty Z pro všechny varianty výměníku

17 248.4	0,005	TiGr2	0,006
17 348.4	0,005	CuZn20Al2As	0,007
VLX 439	0,006	12 021.1	0,007

Střední elastická poměrná obvodová deformace při zborcení ε :

$$\varepsilon = \frac{1}{n_{cyl}^2 - 1 + \frac{Z^2}{2}} \cdot \left\{ \frac{1}{\left(\frac{n_{cyl}^2}{Z^2} + 1 \right)^2} + \frac{e_s^2}{12 \cdot R^2 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot (n_{cyl}^2 - 1 + Z^2)^2 \right\} =$$

$$\frac{1}{2^2 - 1 + \frac{0,005^2}{2}} \cdot \left\{ \frac{1}{\left(\frac{2^2}{0,005^2} + 1 \right)^2} + \frac{0,9^2[mm^2]}{12 \cdot 9,5^2[mm^2] \cdot (1 - 0,3^2)} \cdot (2^2 - 1 + 0,005^2)^2 \right\} =$$

$$= 0,003$$

Tab.4.410. Hodnoty ε pro všechny varianty výměníku

17 248.4	0,003	TiGr2	0,001
17 348.4	0,003	CuZn20Al2As	0,007
VLX 439	0,003	12 021.1	0,007

teoretický tlak při elastické ztrátě stability P_m

$$P_m = \frac{E \cdot e_r \cdot \varepsilon}{R} = \frac{190000[MPa] \cdot 0,9[mm] \cdot 0,003}{9,5[mm]} = 57,677[MPa]$$

Tab.4.411. Hodnoty P_m pro všechny varianty výměníku [MPa]

17 248.4	57,677	TiGr2	18,516
17 348.4	57,677	CuZn20Al2As	120,278
VLX 439	57,966	12 021.1	225,248

Poměr P_m/P_y :

$$\frac{P_m}{P_y} = \frac{57,677 [\text{MPa}]}{14,211 [\text{MPa}]} = 4,058$$

Tab.4.412. Hodnoty P_m/P_y pro všechny varianty výměníku

17 248.4	4,059	TiGr2	1,985
17 348.4	3,861	CuZn20Al2As	8,265
VLX 439	3,700	12 021.1	10,077

Z Obr.8.5 – 5 této normy se určí poměr P_r/P_y :

Tab.4.413. Hodnoty P_r/P_y pro všechny varianty výměníku

17 248.4	0,880	TiGr2	0,750
17 348.4	0,875	CuZn20Al2As	0,959
VLX 439	0,865	12 021.1	0,959

Z tohoto se vypočte P_r :

$$P_r = P_y \cdot 0,880 = 14,211 [\text{MPa}] \cdot 0,880 = 12,505 [\text{MPa}]$$

Tab.4.414. Hodnoty P_r pro všechny varianty výměníku [MPa]

17 248.4	12,505	TiGr2	6,995
17 348.4	13,072	CuZn20Al2As	13,956
VLX 439	13,553	12 021.1	21,437

Dolní hranice tlaku, kdy dojde ke zborcení P_{min} :

$$P_{min} \geq P_{s2}$$

$$\frac{P_r}{S} \geq P_{s2}$$

$$\frac{12,505}{1,5} \geq 0,4$$

$$8,337 [\text{MPa}] \geq 0,4 [\text{MPa}] \quad \text{VYHOVUJE}$$

Tab.4.415. Hodnoty P_{min} pro všechny varianty výměníku [MPa]

17 248.4	8,337	TiGr2	4,663
17 348.4	8,715	CuZn20Al2As	9,304
VLX 439	9,035	12 021.1	14,291

Tloušťka stěny trubek **VYHOVUJE** zatížení vnějším tlakem.

Namáhání při provozním zatížení **VYHOVUJÍ** tloušťky stěn trubek všech materiálů.

4.7 Kompenzátor

Cílem této podkapitoly není pevnostní dimenzování kompenzátoru, ale pouze výběr takového kompenzátoru z běžně vyráběných, který je schopný pokrýt teplotní dilatace trubek a parního pláště.

Zadané parametry:

Trubky:

Výpočtová teplota trubky; $t_{tm} = 150^{\circ}\text{C}$

Součinitel střední teplotní roztažnosti materiálu trubek při teplotě t_{tm} ; $\alpha_{tm} = 16,5 \times 10^{-6} [1/^{\circ}\text{C}]$

Tab.4.416. Hodnoty α_{tm} pro všechny materiály trubek [$1/^{\circ}\text{C}$]

17 248.4	$16,5 \times 10^{-6}$	TiGr2	$9,7 \times 10^{-6}$
17 348.4	17×10^{-6}	CuZn20Al2As	20×10^{-6}
VLX 439	$10,3 \times 10^{-6}$	12 021.1	$11,6 \times 10^{-6}$

Plášť:

Výpočtová teplota pláště; $t_{sm} = 200^{\circ}\text{C}$

Součinitel střední teplotní roztažnosti materiálu trubek při teplotě t_{sm} ; $\alpha_{sm} = 12,1 \times 10^{-6} [1/^{\circ}\text{C}]$

Délka trubkového svazku; $L = 5,76 [\text{m}]$

Tab.4.417. Hodnoty L pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	5760	TiGr2	5150
17 348.4	5760	CuZn20Al2As	4180
VLX 439	4980	12 021.1	4250

Výpočet:

Teplotní prodloužení trubek ΔL_t :

$$\Delta L_t = \alpha_{tm} \cdot L \cdot (t_{tm} - 20[^{\circ}\text{C}]) = 16,5 \cdot 10^{-6} \left[\frac{1}{^{\circ}\text{C}} \right] \cdot 5760 [\text{mm}] \cdot (150[^{\circ}\text{C}] - 20[^{\circ}\text{C}]) = 12,355 [\text{mm}]$$

Tab.4.418. Hodnoty ΔL_t pro všechny materiály trubek [mm]

17 248.4	12,355	TiGr2	6,494
17 348.4	12,730	CuZn20Al2As	10,868
VLX 439	6,668	12 021.1	6,409

Teplotní prodloužení pláště ΔL_s :

$$\Delta L_s = \alpha_{sm} \cdot L \cdot (t_{sm} - 20[^{\circ}\text{C}]) = 12,1 \cdot 10^{-6} \left[\frac{1}{^{\circ}\text{C}} \right] \cdot 5760 [\text{mm}] \cdot (200[^{\circ}\text{C}] - 20[^{\circ}\text{C}]) = 12,545 [\text{mm}]$$

Tab.4.419. Hodnoty ΔL_s pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	12,545	TiGr2	11,217
17 348.4	12,545	CuZn20Al2As	9,104
VLX 439	10,846	12 021.1	9,257

Vzájemná dilatace ΔL :

$$\Delta L = \Delta L_t - \Delta L_s = 12,355[mm] - 12,545[mm] = -0,190[mm]$$

Tab.4.420. Hodnoty ΔL pro všechny varianty výměníku [mm]

17 248.4	-0,190	TiGr2	-4,723
17 348.4	0,185	CuZn20Al2As	1,764
VLX 439	-4,178	12 021.1	-2,848

Záporné znaménko představuje namáhání trubky tahem, kladné pak namáhání tlakem a je potřeba provést kontrolu na vzpěr trubky. U výměníku s přímými trubkami se toto chování eliminuje použitím vhodného kompenzátoru.

Volba kompenzátoru:

Podle tlaku v prostoru parního pláště $P_s = 4\text{bar}$, teploty $t_s = 200^\circ\text{C}$, vnějšího průměru pláště D_{ex} a velikosti vzájemné dilatace pláště a trubek volím podle výrobce Macroflex s.r.o. tyto kovové vlnovcové kompenzátory:

Pro variantu TiGr2: Macroflex – MWA – PN6 – DN 3400 – $\pm 25\text{mm}$

Pro varianty 17 248.4, 17 348.2, VLX 439: Macroflex – MWA – PN6 – DN 3600 – $\pm 25\text{mm}$

Pro variantu CuZn20Al2As a 12 021.1 neodpovídá svými parametry žádný kompenzátor z nabídky běžného sortimentu dostupného na [21], ale tato firma je schopná vytvořit výrobek přímo na "míru" podle dodaných parametrů ostatně tak, jak je tomu běžně v praxi.

Hodnota kompenzační schopnosti kompenzátoru je ovlivněna maximálním počtem zátěžných cyklů. Podle [21] se jedním takovým cyklem rozumí náběh na plné zatížení a odstavení.

Dále podle stejného zdroje:

Katalogové hodnoty kompenzační schopnosti jsou uvedeny pro 1000 zátěžných cyklů po dobu životnosti.

Pro:

1000	cyklů je kompenzační schopnost	100%
5000		63%
11000		50%

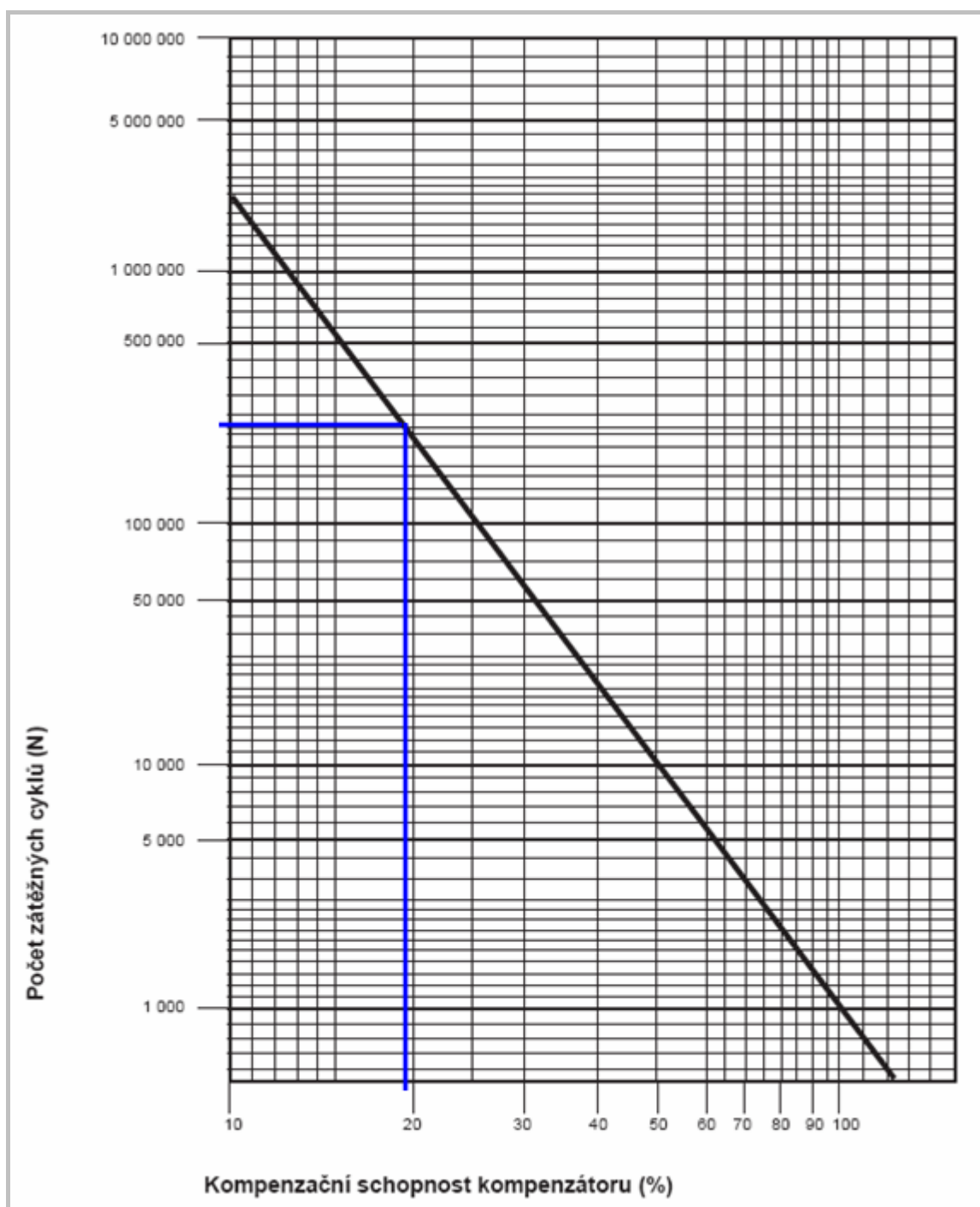
Příklad:

Pro výslednou vzájemnou teplotní dilataci varianty výměníku TiGr2 $\Delta L = -4,723\text{mm}$ se hodnota počtu zátěžných cyklů stanoví:

$$\frac{-25[mm]}{100[\%]} = \frac{-4,723[mm]}{x[\%]} \Rightarrow x = \frac{4,723[mm] \cdot 100[\%]}{25[mm]} = 18,892\%$$

Pak dle diagramu na další straně je počet cyklů zatěžování:

$$N = 300\,000 \text{ cyklů}$$



Graf.4.1. Diagram závislosti počtu cyklů zatěžování na velikosti zatížení, převzato z [21]

5 EKONOMICKÁ EFEKTIVNOST POUŽITÝCH MATERIÁLŮ

Zadání:

Zhodnoťte ekonomickou efektivnost jednotlivých použitých materiálů teplosměnných trubek v horizontu provozování 25 let. K tomu vám konzultant poskytne cenové údaje a předpoklady intervalů nutných výměn teplosměnných trubek.

Zadané parametry:

Přehled dodávaných trubek podle jejich konstrukce viz. Tab.5.1.

Tab.5.1 Typy konstrukce trubek pro všechny materiály teplosměnné plochy

17 248.4	Bezešvé Svařované	TiGr2	Bezešvé Svařované
17 348.4	Bezešvé Svařované	CuZn20Al2As	Bezešvé
VLX 439	Svařované	12 021.1	Bezešvé

Ceny nových trubek C_N pro teplosměnnou plochu velikosti 2800m² viz. Tab.5.2 s respektováním formátu Tab.5.1.

Tab.5.2 Ceny nových trubek C_N pro plochu 2800m² pro všechny materiály [Kč]

17 248.4	39440500 33051920	TiGr2	68421280 50302080
17 348.4	41160120 34131120	CuZn20Al2As	31560920
VLX 439	35646260	12 021.1	27881700

Ceny přetrubkování C_P pro teplosměnnou plochu velikosti 2800m² viz. Tab.5.3.

Tab.5.3 Ceny přetrubkování C_P pro plochu 2800m² pro všechny materiály [Kč]

17 248.4	21072800 15114480	TiGr2	0 0
17 348.4	22756920 16085760	CuZn20Al2As	13995520
VLX 439	15895480	12 021.1	10422800

Počet přetrubkování n_P pro jednotlivé materiály trubek během 25 let je uvedeno v Tab.5.4.

Tab.5.4 Počet přetrubkování n_P během 25 let pro všechny materiály teplosměnné plochy

17 248.4	2 2	TiGr2	0 0
17 348.4	2 2	CuZn20Al2As	2 3
VLX 439	1	12 021.1	6 8

5.1 Výpočet pro plochu 2800m²

Veškeré výpočty budou detailně provedeny pro materiál 17 248.4 – bezešvé, pro ostatní materiály budou výsledky uvedeny v tabulce.

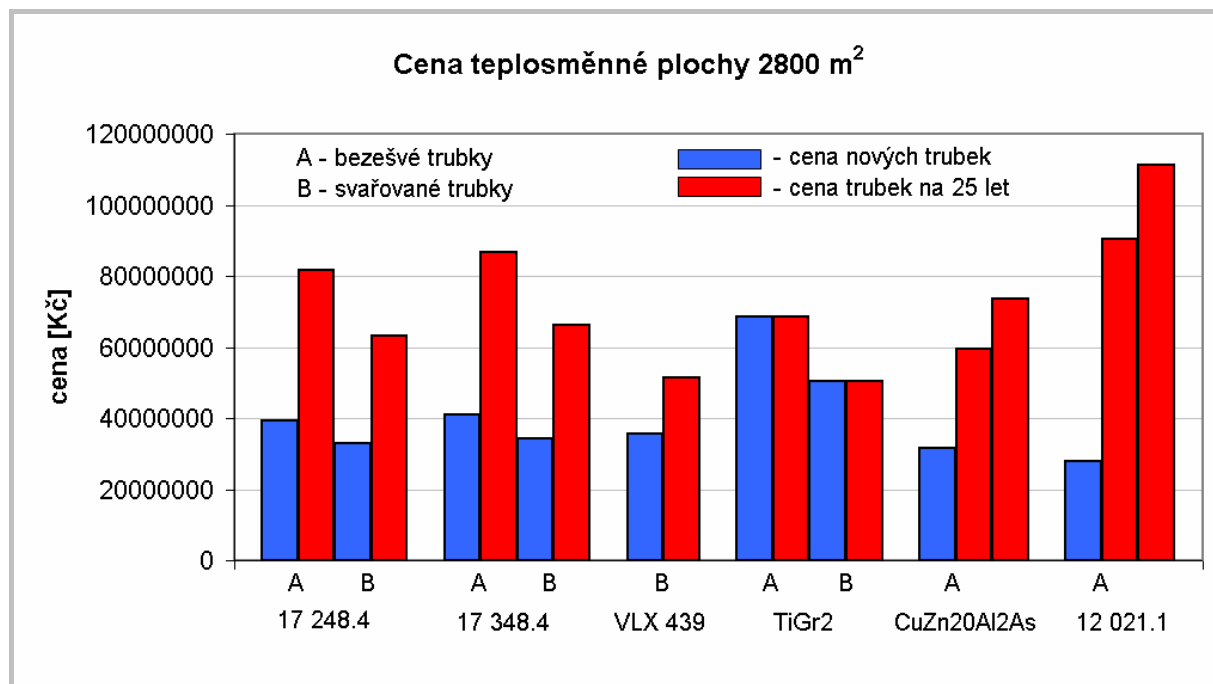
Celková cena teplosměnné plochy pro 25let provozu C_C :

$$C_C = C_N + n_p \cdot C_P = 39440500 [Kč] + 2 \cdot 21072800 [Kč] = 81586100 [Kč]$$

Tab.5.5 Celková cena teplosměnné plochy C_C pro 25let provozu [Kč]

17 248.4	81586100	TiGr2	68421280
	63280880		50302080
17 348.4	86673960	CuZn20Al2As	59551960
	66302640		73547480
VLX 439	51541740	12 021.1	90418500
			111264100

Z výsledných hodnot byl sestrojen Graf.5.1., na kterém jsou zakresleny ceny výsledných teplosměnných ploch z tepelného výpočtu. Ceny jsou uvedeny jak pro cenu nových trubek, tak i pro celkovou cenu trubek na 25let provozu, jsou uvažovány jak bezešvé trubky, tak i svařované. Pro materiály CuZn20Al2As a 12 021.1 je celková cena uvedena i pro oba počty přetrubkování během 25let provozu..



Graf.5.1. Cena teplosměnné plochy 2800m² v závislosti na použitých materiálech a konstrukci trubek

5.2 Výpočet pro výsledné plochy z tepelného výpočtu

Výsledné velikosti teplosměnné plochy z tepelného výpočtu:

Tab.5.6. Výsledné hodnoty $S [m^2]$ pro všechny varianty teplosměnných ploch

17 248.4	3100,134	TiGr2	2725,872
17 348.4	3100,134	CuZn20Al2As	2648,433
VLX 439	2814,872	12 021.1	2834,848

Aby mohly být tyto teplosměnné plochy oceněny je potřeba vypočíst poměr ploch k_s :

$$k_s = \frac{S}{2800[m^2]} = \frac{3100,134[m^2]}{2800[m^2]} = 1,107$$

Tab.5.7. Výsledné hodnoty a_s pro všechny varianty teplosměnných ploch

17 248.4	1,107	TiGr2	0,974
17 348.4	1,107	CuZn20Al2As	0,946
VLX 439	1,001	12 021.1	1,012

Ceny nových trubek pro jednotlivé velikosti teplosměnné plochy C_{Np} :

$$C_{Np} = k_s \cdot C_N = 1,107 \cdot 39440500 [Kč] = 43668141 [Kč]$$

Tab.5.8 Ceny nových trubek C_{ep} pro jednotlivé teplosměnné plochy [Kč]

17 248.4	43668141	TiGr2	66609875
	36594767		48970368
17 348.4	45572088	CuZn20Al2As	29852494
	37789647		
VLX 439	35835593	12 021.1	28228708

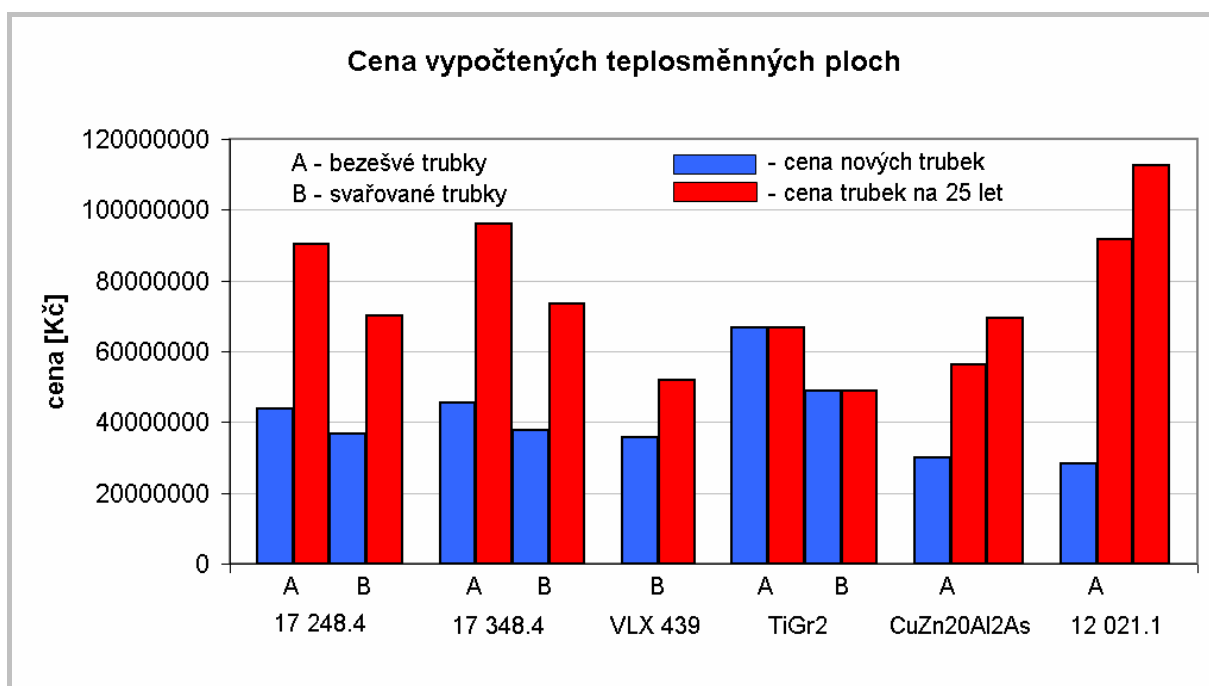
Celková cena trubek jednotlivých teplosměnných ploch pro 25let provozu C_{CP} :

$$C_{CP} = k_s \cdot C_N + k_s \cdot n_p \cdot C_P = 1,107 \cdot 39440500 [Kč] + 1,107 \cdot 2 \cdot 21072800 [Kč] = 90331343 [Kč]$$

Tab.5.9. Celková cena teplosměnné plochy T_{CP} pro 25let provozu pro všechny varianty [Kč]

17 248.4	90331343	TiGr2	66609875
	70063980		48970368
17 348.4	95964573	CuZn20Al2As	56328349
	73409644		69566276
VLX 439	51815500	12 021.1	91543823
			112648861

Z výsledných hodnot byl sestrojen Graf.5.2., na kterém jsou zakresleny ceny výsledných teplosměnných ploch z tepelného výpočtu. Ceny jsou uvedeny jak pro cenu nových trubek, tak i pro celkovou cenu trubek teplosměnné plochy na 25let provozu, jsou uvažovány jak bezešvé trubky, tak i svařované. Pro materiály CuZn20Al2As a 12 021.1 je celková cena uvedena i pro oba počty přetrubkování během 25let provozu.



Graf.5.2. Cena vypočtené teplosměnné plochy v závislosti na použitých materiálech a konstrukci trubek

6 ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo porovnat vliv použitých materiálů trubek teplosměnné plochy na její velikost, pro jednotlivé materiálové varianty teplosměnné plochy spočítat tlakovou ztrátu na straně oběhové vody, navrhnout konečné rozměry výměníků pro jednotlivé mater. varianty z pevnostního dimenzování a také vyhodnotit ekonomickou efektivnost použitých materiálů teplosměnné plochy.

Ve výsledku tepelného výpočtu bylo stanoveno pět velikostí teplosměnné plochy pro šest materiálů. Bylo to tím, že materiály 17 248.4 a 17 348.4 mají stejně velký součinitel tepelné vodivosti materiálu λ a proto i jejich výsledná velikost teplosměnné plochy je stejná. Výsledek výpočtu dokázal, že čím vyšší je součinitel tepelné vodivosti materiálu λ , tím je velikost výsledné teplosměnné plochy menší a naopak. Nejmenší teplosměnná plocha vyšla pro materiál trubek CuZn20Al2As a největší pro materiál 17 248.4 a 17 348.4. Výsledná potřebná teplosměnná plocha byla navržena pro lehce zanesený stav. Dalším výsledkem tepelného výpočtu bylo pro jednotlivé materiály teplosměnné plochy sestavení charakteristik závislosti přenášeného tepelného výkonu na hmotnostním průtoku oběhové topné vody. Výsledné charakteristiky pro jednotlivé materiály jsou téměř totožné, je to způsobeno různou velikostí teplosměnné plochy při současně odlišných hodnotách λ materiálu. Rozdíl by nastal, kdyby pro různě velké hodnoty λ materiálu byla stejná velikost teplosměnné plochy.

Z výsledků hydraulického výpočtu byly stanoveny rozměry vstupních / výstupních hrdel na straně oběhové topné vody a na straně syté páry / kondenzátu. Dále byly vypočteny celkové tlakové ztráty na straně oběhové topné vody pro všechny materiálové varianty teplosměnné plochy. Rozhodující vliv na velikost tlakové ztráty měla délka trubkového svazku a také rychlost proudění oběhové vody. Největší tlaková ztráta vyšla u materiálů s nejdelším trubkovým svazkem, tedy pro materiály 17 248.4 a 17 348.4.

Pevnostním dimenzováním byly dány minimální bezpečné hodnoty tloušťky stěn jednotlivých komponent výměníku včetně hrdel. Výsledná minimální hodnota tloušťky trubkovnice leží mimo mě přístupných rozsahů tloušťky plechů dle dané normy. Pokud se vyrábějí plechy tohoto materiálu dle dané normy i v rozsahu tloušťky, do které zapadá mnou navržená minimální tloušťka trubkovnice, pak je vše v pořádku a výměník lze navrhnout podle parametrů zadání. V jiném případě je vhodné upustit od dvoucestného uspořádání a raději navrhnout výměník jednocestný, který bude delší, ale trubkovnice nebude tak namáhána a bude mít menší tloušťku. Dále byl vybrán vhodný kovový vlnovcový kompenzátor pro pokrytí teplotní dilatace trubkového svazku a parního pláště.

V posledním bodě této diplomové práce byly vypočteny ceny pro jednotlivé teplosměnné plochy podle druhu materiálu. Vliv na konečnou cenu teplosměnné plochy pro 25 let provozu měla kromě druhu materiálu také i konstrukce trubek a počet přetrubkování během 25 let provozu. Nejlepší efektivnosti dosáhly materiály CuZn20Al2As, TiGr2 a VLX 439.

Podle předchozích výsledků bych jako nejvhodnější materiál teplosměnné plochy uvažoval materiál CuZn20Al2As, jehož výsledná teplosměnná plocha měla v porovnání s ostatními materiály nejmenší potřebnou velikost, malé tlakové ztráty a také velmi dobrou ekonomickou efektivnost.

Práce splňuje vytyčené cíle zadání.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

Literatura:

- [1] Firemní literatura ALSTOM Power, s.r.o.
- [2] Mareš R., Šifner O., Kadrnožka J.: Tabulky vlastností vody a páry podle průmyslové formulace IAPWS – IF97, VUTIUM 1999
- [3] Kadrnožka J., Ochrana L.: Teplárenství, CERM, s.r.o. Brno, 2001
- [4] Pavelek M. a kolektiv: Termomechanika, CERM, s.r.o. Brno, 2003
- [5] Jícha M.: Přenos tepla a látky, CERM, s.r.o. Brno, 2001
- [6] Šob F.: Hydromechanika, CERM, s.r.o. Brno, 2002
- [7] Stehlík P., Kohoutek J., Němčanský J.: Tepelné pochody, výpočet výměníku tepla, VUT Brno, 1991
- [8] Ibler Z. a kolektiv: Technický průvodce energetika, BEN Praha, 2002
- [9] Ibler Z. a kolektiv: Energetika v příkladech, BEN Praha, 2003

Použité normy:

- [10] AD – Merkblatt W 6/2
- [11] ČSN EN 10028 – 2
- [12] ČSN EN 13445 – 3
- [13] ČSN 10 029
- [14] ČSN 41 1418
- [15] ČSN 41 2021
- [16] ČSN 41 7248
- [17] ČSN 41 7348
- [18] DIN 17 861
- [19] DIN 28 013
- [20] UNS S43035

Internet:

- [21] *MACROFLEX* [online]. [cit.2009-02-09]. URL < <http://www.macroflex.cz> >

SEZNAM PŘÍLOH

1x A1 č.v.: 50/1 – 09 – 01: OHŘÍVÁKY OBĚHOVÉ TOPNÉ VODY

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

Tepelný výpočet

A	[m ²]	průtočný průřez v jedné cestě
C, m, n	[-]	konstanty pro výpočet Nu
c _p	[J/kgK]	měrná tepelná kapacita
d	[m]	vnější průměr trubky
g	[m/s]	gravitační zrychlení
i	[J/kg]	entalpie
k	[W/m ² K]	součinitel prostupu tepla
L	[m]	délka
l	[J/kg]	latentní teplo
M	[kg/s]	hmotnostní tok
n _{tr}	[-]	počet trubek v jedné cestě
n _{ty}	[-]	průměrný počet trubek řazených pod sebou
N	[-]	počet trubek pod sebou pro výpočet α _{SN}
Nu	[-]	Nusseltovo číslo
P	[Pa]	tlak
Pr	[-]	Prandtlovo číslo
Q	[W]	tepelný výkon
R	[m ² K/W]	tepelný odpor
Re	[-]	Reynoldsovo číslo
S	[m ²]	teplosměnná plocha
t	[m]	tloušťka stěny trubky (nemá indexy)
t	[°C]	teplota (s indexy)
w	[m/s]	rychlost proudění
α	[W/m ² K]	součinitel přestupu tepla konvekcí
ρ	[kg/m ³]	hustota
η	[kg/ms]	dynamická viskozita kondenzátu
ν	[m ² /s]	kinematická viskozita
λ	[W/Km]	tepelná vodivost
ΔL	[m]	délka elementárního dílku
Δ _{tv}	[°C]	teplotní spád na vstupu
Δ _{tm}	[°C]	teplotní spád na výstupu
Δ _{tL}	[°C]	střední logaritmický teplotní spád

Dolní indexy:

A	hodnoty na straně syté páry
B	hodnoty na straně oběhové vody
CH	týkající se části CH
K1	týkající se části K1
K2	týkající se části K2
M	hodnoty pro danou hodnotu hmotnostního průtoku
N	hodnoty pro N – tou trubku
S	hodnoty na straně syté páry
W	hodnoty na straně oběhové vody
Z	zanesení
max	maximální hodnota

in	hodnoty na vstupu
out	hodnoty na výstupu
str	pro střední hodnotu
vnit	vnitřní hodnota např. d_{vnit}
1	vnější stěna
2	vnitřní stěna

Horní indexy:

'	hodnoty pro kondenzát
''	hodnoty pro sytou páru

Hydraulický výpočet

a	[m]	šířka hrdla
b	[m]	délka hrdla
D	[m]	vnitřní průměr hrdla
i	[J/kg]	entalpie
k_t	[m]	střední absolutní drsnost stěny
k_{rl}	[m]	relativní drsnost stěny
L	[m]	délka
M	[kg/s]	hmotnostní tok
n_{CH}	[-]	počet chodů
n_{tr}	[-]	počet trubek v jedné cestě
P	[Pa]	tlak
Q	[W]	tepelný výkon
Re	[-]	Reynoldsovo číslo
S	[m ²]	průtočný průřez
δ	[m]	tloušťka stěny nánosů
t	[°C]	teplota
w	[m/s]	rychlost proudění
X_9	[-]	substituční faktor
X_{10}	[-]	substituční faktor
Z_1	[-]	korekční faktor
Z_2	[-]	korekční faktor
α	[W/m ² K]	součinitel přestupu tepla konvekcí
ρ	[kg/m ³]	hustota
λ_{11}	[-]	ztrátový faktor
η	[kg/ms]	dynamická viskozita kondenzátu
ξ_{11}	[-]	ztrátový součinitel pro vstup a výstup z trubk. svazku
ξ_{12}	[-]	ztrátový součinitel ohybu proudu v komoře
ΔL	[m]	délka elementárního dílku
Δp_t	[Pa]	tlaková ztráta třením v potrubí
Δp_m	[Pa]	tlaková ztráta místními odpory
Δp_z	[Pa]	celková tlaková ztráta

Dolní indexy:

S	hodnoty na straně syté páry
W	hodnoty na straně oběhové vody
Z	zanesení

max	maximální hodnota
in	hodnoty na vstupu
out	hodnoty na výstupu
str	pro střední hodnotu
vnit	vnitřní hodnota např. d_{vnit}
2	vnitřní stěna

Horní indexy:

'	hodnoty pro kondenzát
''	hodnoty pro sytou páru
a	proměnný exponent závisující na Re

Pevnostní výpočet

Af	[m ²]	nosná plocha příčného průřezu
Ap	[m ²]	plocha zatížená tlakem tekutiny
Ap _p	[m ²]	plocha zatížená tlakem tekutiny podélný řez
Ap _{př}	[m ²]	plocha zatížená tlakem tekutiny příčný řez
A _r	[m ²]	plocha průřezu otrubkované oblasti
A _x	[m ²]	plocha průřezu otrubkované oblasti
A ₁ , A ₂	[N]	zatížení ploch průřezů
a	[m]	vzdálenost středu otvoru od kraje hrdla, otvoru
a _x	[m]	výška svaru
a _T	[m]	efektivní tloušťka nebezpečného průřezu
b _F	[m]	skutečná šířka příruby jako části trubkovnice
b _R	[m]	střední šířka neotrubkovaného okraje trubkovnice
b _S	[m]	skutečná šířka neotrubkovaného okraje
c	[m]	korozní úbytek
d, D	[m]	průměr
D _m	[m]	střední průměr pláště
d ₀	[m]	průměr otvoru v trubkovnici pro trubku
d _k	[m]	vnitřní průměr kompenzátoru
E	[Pa]	modul pružnosti
e	[m]	tloušťka stěny komponenty
f	[Pa]	dovolené namáhání
f _c	[Pa]	dovolené podélné tlakové napětí
f _t	[Pa]	dovolené podélné tahové napětí
f _R	[Pa]	redukováné napětí ve svaru
f _X	[Pa]	vypočt. konstrukční napětí pro spoj trubky s trubkovnicí
h	[m]	výška klenutí den
h ₁	[m]	délka válcové části dna
L	[m]	vzdálenost mezi trubkovnicemi
L ₁ , L ₂ , L ₃	[Pa]	zatěžovací parametry pro výpočet poměru zatížení
l _b	[m]	délka vnější části hrdla
l _{bi}	[m]	vnitřní část hrdla
l _{bo}	[m]	maximální vyztužující délka vnější části hrdla
l _s	[m]	délka skořepiny mezi otvorem a diskontinuitou
l _{so}	[m]	maximální vyztužující délka skořepiny

l_p	[m]	šířka výztužného límce
l_{tk}	[m]	vzpěrná délka trubek
l_X	[m]	délka zaválcování trubky v trubkovnici
M_A	[N]	účinný ohybový moment od zatížení ve šroubech
M_B	[N]	účinný ohybový moment od tlaku tekutiny
M_C	[N]	reakční ohybový moment od připojených komponent
M_D	[N]	omezení reakčního ohybového momentu na d_2
M_2	[N]	výsledný ohybový moment na průměru d_2
N_t	[-]	počet trubek
n	[-]	počet vln
P	[Pa]	tlak
P_D	[Pa]	přímý rozdíl tlaků
P_E	[Pa]	efektivní rozdíl tlaků tekutiny v otrubkované oblasti
P_l, P_A	[Pa]	výslednice aktivních a reaktivních sil na jednotku plochy
P_M	[Pa]	tlak reprezentující výsledný ohybový moment
P_m	[Pa]	tlak při ztrátě elast. stability
P_Q	[Pa]	tlak reprezentující výslednou efektivní axiální sílu
P_R	[Pa]	tlak reprezentující výslednou aktivní axiální smyk. sílu
P_r	[Pa]	dovolený tlak
P_y	[Pa]	tlak při mezi kluzu
p	[m]	rozteč trubek
Q_A, Q_I	[Pa]	reakční tlaky
R	[m]	vnitřní poloměr kulové střední části klenutého dna
R_m	[Pa]	mez pevnosti v tahu
R_{eH}	[Pa]	horní mez kluzu
$R_{p1,0}$	[Pa]	minimální hodnota meze kluzu při 1,0%
$R_{p0,2}$	[Pa]	minimální hodnota meze kluzu při 0,2%
r	[m]	malý poloměr klenutí dna
r_0	[m]	poloměr kružnice středů nejvzdálenějších trubek
r_{is}	[m]	poloměr vnitřní stěny skořepiny
r_{ms}	[m]	poloměr vnitřní stěny skořepiny příčný řez
t	[m]	tloušťka polotovaru (bez indexu)
t	[°C]	teplota (s indexy)
u, v, w	[-]	pomocné hodnoty
w_{min}	[m]	minimální vzdálenost otvoru od diskontinuity
X	[-]	poměr vnitřního poloměru anuloidového přechodu
X_T, X_S	[-]	relativní plochy v otrubkované oblasti
Y, Z	[-]	pomocné parametry
z	[-]	svarový součinitel
α	[1/°C]	součinitel střední teplotní roztažnosti
β	[-]	pomocný výpočtový součinitel pro klenuté dno
ε	[-]	střední elast. poměrná obvodová deformace při zborcení
φ	[-]	relativní pevnost v ohybu
Φ_B, Φ_W	[-]	poměry zatížení
κ	[-]	relativní pevnost ve smyku
κ_p	[-]	modifikovaný parametr pevnosti
λ_R, λ_S	[-]	geometrický parametr pro neotrubkovaný okraj
δ	[m]	dolní úchylka tloušťky
δ_X	[-]	součinitel relativní pevnosti pro spoj trubky s trubkovnicí
η	[-]	parametr rozdělení momentů

ϑ	[-]	relativní plocha průřezu trubek v otrubkované oblasti
ζ	[-]	parametr rozdělení sil
σ_e	[Pa]	dovolená elastická mezní hodnota
σ_p	[Pa]	aktivní podélné tlakové napětí
ν	[-]	Poissonova konstanta
$[Q_t], [Q_c]$	[Pa]	dovolené axiální síly na jednotku plochy trubk. svazku
ΔL	[m]	teplotní prodloužení

Dolní indexy:

A	otrubkovaná oblast trubkovnice
av	průměrná
C	vodní komora
D	klenuté dno
F, P	trubkovnice
S	pro parní prostor, prostor média v plášti, plášť
T	pro vodní prostor, prostor média v trubkách, trubky
b	otvor, hrdlo
e	efektivní
p	výztužný límec
w	svar
cyl	válcový plášť
ex	vnější
max	maximální hodnota
min	minimální hodnota
opt	optimální hodnota
tm	materiálu trubek
ts	materiálu pláště
vnit	vnitřní
vyp	vypočtená
1	vnější
2	skutečný
20	pro teplotu 20°C, montážní teplota
φ	vliv šikmě umístěného hrdla pod úhlem φ

Horní indexy:

'	efektivní hodnota
---	-------------------

Ekonomická efektivnost použitých materiálů

C	[Kč]	cena
n	[-]	počet, četnost

Dolní indexy:

C	celková na 25 let
N	nové trubky
P	přetrubkování
p	vztaženo na výslednou plochu z tepelného výpočtu